

Multivariate Herkunftsanalyse von Marmor auf petrographischer und geochemischer Basis

**Das Beispiel kleinasiatischer archaischer, hellenistischer und römischer
Marmorobjekte der Berliner Antikensammlung und ihre Zuordnung zu
mediterranen und anatolischen Marmorlagerstätten**

Vorgelegt von

Diplom-Mineraloge

Thomas Cramer

Von der Fakultät VI

Bauingenieurwesen & Angewandte Geowissenschaften

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften

- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Dominik

Berichter: Prof. Dr. rer. nat. Klaus Germann

Berichter: Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Franz

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 6. 9. 2004

Berlin 2004
D83

Vorwort

Diese Arbeit wäre ohne die Hilfe, Ermunterung und Unterstützung zahlreicher Personen nicht entstanden, denen ich meinen Dank aussprechen möchte. An erster Stelle meinem Doktorvater und schon seit langem in der Herkunftsbestimmung antiker Marmore aktivem Betreuer Professor Klaus Germann. Auf archäologischer Seite wäre ohne den Leiter der Berliner Antikensammlung Professor Wolf-Dieter Heilmeyer sowie Dr. Volker Kästner gar nichts gelaufen, mit denen Klaus Germann und ich auch zwei ebenso interessante wie schöne Exkursionen in die Türkei unternommen haben. Sandro Schmidt, Vincent Tannert, Matthias Koch-Moeck, Rosemarie Geffe, Conny Lange, Conny Engelhardt, Bernd Kleeberg und andere halfen mir, das Datenmaterial zusammenzutragen und das tägliche Uni-Chaos in den Griff zu bekommen, Stephanie Gerlach sichtete im Vorfeld einen Teil der archäologischen Literatur. Professor Gerhard Franz, Professor Ugur Yaramanci und Professor Johannes Schroeder gaben wertvolle Hinweise. Dr. Peter Dulski am GFZ Potsdam und Antje Eulenburg am Alfred-Wegener-Institut Potsdam führten mit großem Engagement geochemische Analysen durch, ohne Professor Hans-W. Hubberten, Dr. Hanno Meyer, Dr. Ulrich Wandt und Lutz Schönicke hätte es wohl keine Isotopenanalysen gegeben. Professor Norman Herz stellte seine Isotopendatenbank zur Verfügung. Professor Juergen Schram brachte etwas analytisches Licht in die Ursachen des Gestanks von Marmor. Dr. Danielle Decrouez und Professor Karl Ramseyer sei für die schönen Kathodolumineszenzaufnahmen gedankt, Professor Yannis Maniatis und Dr. Donato Attanasio für ESR-Analysen, wobei letzterer mir noch sein ausgezeichnetes und teures Marmorbuch geschenkt hat. Auch von Professor Lorenzo Lazzarini wurde ich mit viel nützlicher Literatur versorgt, ebenso von Dr. Martin Maischberger und Professor Harald W. Müller (Wien). Christian Kronwirth schickte spontan Marmorproben und Bilder aus Magnesia, Dr. Ünsal Yalcin betreute mich in Bochum und stellte Material aus Milet zur Verfügung, das später veröffentlicht wird. Ohne Dr. Nuşin Asgari, Dr. Mümtaz Colak sowie die Professoren Özcan Dora, Erdoğan Yüzer und Wolfgang Radt wären die Fahrten in die Türkei mit weniger Highlights verlaufen. Professor Richard Prikyl (Prag), Dr. Franziska Lang, Dr. Astrid Dostert und Professor Joseph Riederer sei für die Geduld und Unterstützung bei diversen Publikationen gedankt, Joachim Gadow und Donald Baerg für Englischkorrekturen. Professor Gerhard Schulze führte mich in den Arbeitskreis Archäometrie ein, und den daraus resultierendem Stress kann ich ihm nicht verübeln. Doch bei allem Engagement und Hilfe wäre ohne die finanzielle Unterstützung durch die DFG die gesamte Arbeit nicht möglich gewesen.

Wer hier fehlt möge mir verzeihen, insbesondere meine Freunde und Familie, die ich in den letzten Jahren sträflich vernachlässigt habe, besonders meine Mutter und meine Schwester Barbara. Aber zu Recht nicht verzeihen würde mir das Unterlassen eines großen Dankeschöns meine Frau Marta Lucia Quiroga-Riviere.

Zusammenfassung

Am Beispiel von aus Kleinasien stammenden Grabungsfunden in der Antikensammlung Berlin wird die Methodik der Herkunftsanalyse von Marmoren, d.h. der Zuordnung zu ihren Lagerstätten, weiterentwickelt und erprobt. Dazu wird der aktuelle Forschungsstand kritisch gewürdigt, die Voraussetzungen, Bedingungen und Grenzen der Provenienzbestimmung werden systematisiert und von den zahlreichen Gesteinsmerkmalen und Untersuchungsmethoden die geeignetsten ausgewählt.

Marmore von 38 Sammlungsobjekten, die den Untersuchungsregionen Pergamon und Mäandertal zuzuordnen sind, konnten im Rahmen von Restaurierungsmaßnahmen beprobt und analysiert werden. Zwei mit Archäologen durchgeführte Surveys im Gelände ermöglichten die Beprobung zahlreicher westanatolischer Lagerstätten und bestätigten die Unverzichtbarkeit eines interdisziplinären Ansatzes für ein besseres Verständnis von Materialeigenschaften und Werksteinnutzung in der Antike. Zusammen mit weiterem antikem Material sind insgesamt 232 Einzelproben von antiken Fundstücken sowie 262 Lagerstättenproben mit geowissenschaftlicher Methodik untersucht worden.

Ein multivariater analytischer Ansatz erwies sich als notwendig, weil lediglich ein oder zwei geogene Merkmale für die Beantwortung der Herkunftsfrage nicht ausreichen, da sich die Eigenschaften von Marmorlagerstätten oft stark überlappen. Dabei haben sich zusätzlich zu aufwändiger geochemischer Analytik die petrographischen Merkmale als fundamental erwiesen. Ein entwickelter Katalog „äußerer Merkmale“ setzt auch Nicht-Geowissenschaftler in die Lage, Marmorbestimmungskriterien systematisch anzuwenden. Erstmals eingesetzte photographische und digitale Übersichtsaufnahmen von über 300 Marmor-Dünnschliffen erlauben eine qualitative und halbquantitative Erfassung und Unterscheidung wesentlicher Gefügemerkmale. Mittels XRD wurden die Dolomitgehalte quantifiziert, die mit Mg-Gehalten eine gute Korrelation zeigen. Trotz häufiger Überlappungen der Isotopenfelder konnte die Erfassung von δC und δO wertvolle Herkunftshinweise liefern. Mittels ICP-OES wurden die vorzugsweise im säurelöslichen Karbonatgitter eingebauten chemischen Elemente Mg, Fe, Sr und Mn bestimmt, mittels ICP-MS die SEE. Verfahren der multivariaten Statistik (Faktoren-, Cluster- und Diskriminanzanalyse) bestätigen die geologische Relevanz sowie die gegenüber Absolutgehalten verbesserte Eignung bestimmter SEE-Verteilungsmuster und Elementverhältnisse für die Herkunftsbestimmung (z.B. Summe der SEE/Y, PAAS-normierte negative Cer-Anomalie, Fe/Sr). An wenigen Proben wurde gaschromatographisch die potentielle diskriminatorische Eignung der qualitativ und quantitativ erfassten flüchtigen Einschlüsse untersucht, die häufig geruchsbildend und für manche Lagerstätten typisch sind. Ergänzend bestätigten Kathodolumineszenz- und Elektrospektroskopieanalysen insbesondere die prokonnesischen Zuordnungen einiger antiker Artefakte.

Von mehreren Lagerstätten (auch mit antiken Abbauspuren, wie im Kozak, Stratonikeia, Euromos, Priene, NW-Ufer Bafa-See und Myus) konnten zum ersten Mal petrographische, isotopische und geochemische Merkmalsmuster ermittelt werden. Für andere Lagerstätten (u.a. Marmara/Prokonnesos, Ephesos, Aphrodisias, Thasos-Aliki) wurden die publizierten Merkmale bestätigt und erweitert.

Für Pergamon, das über keine lokalen Marmorlagerstätten verfügt, kann die Einfuhr von Marmoren hauptsächlich aus Prokonnesos, Ephesos und Lesbos, untergeordnet von Hymettos und Thasos-Aliki belegt werden. Prokonnesische Marmore wurden daneben in Troja, Athen und Ephesos nachgewiesen. In den antiken Stätten im Mäandertal (Milet, Didyma und Myus) wurden hauptsächlich Marmore aus nahegelegenen Brüchen um den Bafa-See (Herakleia, „Milet“ und kleinere Vorkommen bei Myus) verwendet, in Milet untergeordnet auch von Thasos. In Magnesia kamen lokale Marmore zur Verwendung, aber auch solche vom Bafa-See. In Priene wurden hauptsächlich anstehende Marmore eingesetzt, aber auch von Phourni, die ebenfalls im Heraion von Samos Verwendung fanden. Carrara- und Wunsiedel-Marmore finden sich an modernen Ergänzungen des Pergamonaltars, der ansonsten aus prokonnesischem Marmor errichtet wurde. Pentelische, parische, naxische oder thessalische Marmore ließen sich an keinem antiken Objekt nachweisen.

Das gesamte Probenmaterial steht in der Antikensammlung für weitere Untersuchungen zur Verfügung.

Die im Rahmen der Dissertation erstellte multivariate Material- und Wissensdatenbank diente als Grundlage für die Entwicklung eines bedienerfreundlichen und erweiterbaren Diagnosesystems zur Marmorbestimmung (MarbExpert) auf der Basis einer Expertensystem-Shell, die auch unscharfes Wissen verarbeiten kann („fuzzy logic“). Neben geowissenschaftlich relevanten Fragen werden logistische und archäologische Gesichtspunkte berücksichtigt. Mit Hilfe dieses wissensbasierten Werkzeugs werden auch Nicht-Geowissenschaftler in die Lage versetzt, mit einem hohem Maß an Aussagekraft Herkunftshinweise für Marmore zu erhalten.

Abstract

Using marble objects in the Berlin Collection of Classical Antiquities, the methods of provenance analysis, i.e. their correlation to marble quarries, were applied and improved. For this purpose, the actual state of the art as well as the conditions and limits of provenance determination are systematically considered, selecting the most suitable among the various marble patterns and analysing techniques.

Marbles of 38 museum objects mainly from the two investigation areas, Pergamon and Meander Valley, could be sampled in the context of restoration works and analysed. Two field trips with archaeologists allowed the sampling of various West Anatolian marble quarries and confirmed that an interdisciplinary approach is indispensable for a better understanding of the properties and use of dimension stones in antiquity. 232 single samples of ancient material as well as 262 quarry samples were analysed using geoscientific techniques. A multivariate approach proved to be necessary, because as a result of overlapping of properties of marble quarries, only one or two geogenic characteristics are not sufficient for provenance determination. Apart from sophisticated analytical techniques, petrographic patterns proved to be of uppermost importance. A catalogue of “outer patterns” will allow the application of systematic marble determination criteria also by non-geologists. More than 400 analogue and digitalized microphotographs of whole thin sections allow a qualitative and semi-quantitative overview and distinction of essential fabric patterns. Dolomite contents determined by means of XRD proved to have a good correlation with Mg-contents. In spite of frequently overlapping of stable isotopic-fields, δC and δO proved to be very helpful in some cases. The mainly carbonate-lattice-bound elements Mg, Fe, Sr and Mn were determined by means of ICPOES, the REE by means of ICPMS. Methods of multivariate statistics, i.e. factor-, cluster- and discrimination analysis, confirmed the geoscientific relevance as well as the improved significance of some element correlations (e.g. sum of REE/Y, negative cerium-anomaly, Fe/Sr) compared to absolute values. On few samples, the potential discriminatory potential of volatile inclusions responsible for a sometimes typical odour, was investigated by means of gas chromatography. Additionally, cathodoluminescence- and electro paramagnetic resonance analysis confirmed particularly the Proconnesian origin of some ancient artefacts.

The petrographic, isotopic and geochemical properties of several quarries (including those with ancient traces, such as Kozak, Stratonikeia, Euromos, Priene, NW shore of the Bafa Gölü and Myus) are reported for the first time. The published data of other quarries (e.g. Marmara/Proconnesos, Ephesos, Aphrodisias, Thassos Alikı) are confirmed and extended. In Pergamon, lacking local marble quarries, marble import took place mainly from Proconnesos, Ephesos and Lesbos and, to a much smaller extent, from Hymettos and Thassos Alikı. The use of Proconnesian marble could be determined also in Troy, Athens and Ephesos.

For the ancient sites in the Meander Valley (Milet, Didyma and Myus), mainly marbles from the nearby quarries of the Bafa lake area (Herakleia, „Milet“ and smaller deposits near Myus) were used, in Milet in smaller amounts also from Thassos. In Magnesia, local marbles as well as marbles from the Bafa lake were used. In Priene, mainly local marbles were used, however, also those from Phournı island, which were used also in the Heraion on Samos. Marbles from Carrara and Wunsiedel can be found in modern restoration supplements of the Pergamon altar, which was erected completely in Proconnesian marble. No marble from Penteli, Paros, Naxos or Thessaly was found on the investigated objects.

The whole set of sample material will be stored in the Pergamon Museum for further investigations.

The multivariate material and knowledge data base acquired in the context of this dissertation served as a base for the development of an easy-to-use and extensible diagnostic system for marble determination (MarbExpert) implemented into an expert system shell able to work also with „fuzzy“ knowledge using „fuzzy logic“. Apart from geoscientific relevant questions, also logistic and archaeological aspects are considered. This knowledge-based tool allows also non-geoscientists to find hints for provenance determination with a high degree of reliability.

Resumen

En este trabajo esta siendo mejorada y probada la metodología del análisis de la procedencia de los mármoles – es decir su asignación a yacimientos – utilizando hallazgos encontrados en las excavaciones en Asia Menor, que hoy se encuentran en la Colección de Antigüedades del Museo de Pérgamo en Berlín. Para este objetivo se ha evaluado críticamente el estado actual de la investigación, se han sistematizado las condiciones, los prerequisites y las limitaciones para la determinación de la procedencia; además de esto, dentro de las diversas características de las rocas y los diferentes métodos de investigación, se han elegido los más apropiados.

En el contexto de los trabajos de restauración se pudieron extraer y analizar muestras de mármol de 38 objetos de la colección del museo provenientes de los dos áreas de investigación principal – Pérgamo y el Valle del Menderes. Dos expediciones acompañadas por arqueólogos permitieron tomar muestras de varios yacimientos en Anatolia Occidental y confirmaron la necesidad imperiosa de un enfoque interdisciplinario para una mejor comprensión de las características del material y de la utilización en la Antigüedad de las rocas. En total han sido investigadas con métodos geocientíficos 232 muestras particulares de objetos del museo y 262 de yacimientos. Se mostró indispensable un enfoque multivariado, porque solo una o dos características no eran suficientes para resolver la cuestión del origen debido a la frecuente y fuerte superposición de las características de varios de los yacimientos de mármol. Además de las técnicas sofisticadas de análisis geoquímico, se mostraron de máxima importancia las características petrográficas.

Un catálogo desarrollado de « características exteriores » permite también a los no geocientíficos la aplicación sistemática de criterios para la determinación de los mármoles. Microfotografías análogas y digitales de todo el areal de unos 400 cortes delgados dan una visión general y permiten obtener tanto un registro cualitativo y semi-cuantitativo como también la distinción de características estructurales esenciales. Los contenidos cuantitativos de dolomita tomados por medio de XRD mostraron una buena correlación con Mg. Pese a la frecuente superposición de campos isotópicos, la toma de δC_{PDB} y δO_{PDB} dio indicaciones valiosas acerca de la procedencia de los mármoles. Por medio de ICP-OES fueron determinados los elementos químicos Mg, Fe, Sr y Mn contenidos principalmente en la red cristalina del carbonato, los REE por medio de ICP-MS. Los métodos de estadística multivariada (análisis factorial, cluster, discriminatorio) confirmaron tanto la relevancia geológica así como también la utilidad mejorada de ciertas relaciones y muestras de distribución (e.g. summa de REE/Y, anomalía negativa de Ce normalizada a PAAS, Fe/Sr) comparada con los contenidos absolutos. Por medio de la cromatografía de gas fue investigado el potencial discriminatorio de las fases volátiles, las cuales producen un olor típico en algunos yacimientos. Adicionalmente, el análisis de la catodoluminiscencia y de los espectros de resonancia paramagnética electrónica confirmaron especialmente la procedencia de la isla de Proconnesos de algunos objetos antiguos. Por primera vez fueron tomadas características petrográficas, isotópicas y geoquímicas de varios yacimientos (incluyendo algunos con rastros de explotación antigua, en el Kozak, Stratonikeia, Euromos, Priene, en el noroeste de la orilla del lago de Bafa y Myus). Para otros yacimientos (e.g. Marmara / Proconnesos, Ephesos, Aphrodisias, Thassos-Aliki) fueron confirmadas y ampliadas características ya publicadas. En Pérgamo, que no dispone de yacimientos de mármol propios, se demostró la importación de mármoles principalmente de Proconnesos, Ephesos y Lesbos, y, en menor escala, de Hymettos y Thassos. Mármoles de Proconnesos también se comprobaron en Troya, Atenas y Ephesos. En los sitios antiguos del Valle del Meandro (Milet, Didyma y Myus), se utilizaron principalmente mármoles de las canteras cercanas alrededor del lago Bafa (Heracleia, « Milet » y de depósitos menores cerca de Myus), en Milet también de Thassos. En Magnesia se utilizaron mármoles locales e igualmente del lago Bafa. En Priene se emplearon principalmente mármoles locales, pero también aquellos de Phourni, que fueron usados así mismo en el Heraion de Samos. Mármoles de Carrara y Wunsiedel se encuentran en añadiduras modernas del Altar de Pérgamo, el cual en su totalidad fue erigido con mármol proveniente de Proconnesos. La utilización de mármoles de Penteli, Paros, Naxos o Thessalia no se pudo confirmar en ninguno de los objetos antiguos investigados. Todo el material de muestras será depositado en la Colección de Antigüedades y puesto a disposición para investigaciones futuras.

La base de datos de material y conocimiento creada en el contexto de esta tesis doctoral sirvió como punto de partida para el desarrollo de un sistema de diagnóstico para la determinación de la procedencia de los mármoles (MarbExpert) implementado en un sistema experto capaz de procesar a través de „fuzzy logic“, es decir que puede trabajar también a través de conocimiento borroso. Toma en consideración no solamente cuestiones de relevancia geocientífica sino igualmente aspectos logísticos y arqueológicos. Con ayuda de esta herramienta basada en conocimiento se permitirá de igual manera a los no geocientíficos conseguir con un alto grado de certeza indicaciones sobre la procedencia de los mármoles.

1	Von den Artefakten der Antikensammlung zur Charakterisierung ihrer Marmorlagerstätten ..	10
1.1	Was ist und wofür dient Archäometrie?	11
1.2	Ziele und Voraussetzungen der Provenienzanalyse.....	11
2	Untersuchungsgegenstand.....	13
2.1	Marmorartefakte der Antikensammlung – Kurze Übersicht.....	13
2.2	Geologischer Rahmen der Marmorlagerstätten im östlichen Mittelmeerraum und westlichen Kleinasien	15
2.3	Allgemeiner regionalgeologischer Überblick Griechenlands und der Türkei	16
2.4	Regionaler Überblick der Türkei	18
2.4.1	Pontiden	18
2.4.2	Anatoliden.....	19
2.4.3	Tauriden	19
2.5	Marmor: Definition, Entstehung, Eigenschaften, Verwendung, Abbau.....	20
2.5.1	Calcit-Dolomit	20
2.5.2	Verknüpfung von Mikro- und Makrostruktur.....	21
2.5.3	Kalksteine.....	22
2.5.4	Metamorphe Marmorbildung.....	23
2.5.5	Festigkeit und Trennflächen.....	23
2.5.6	Lagerstätten und Steinbrucharanlagen	24
2.5.7	Gewinnung von Marmoren	26
2.5.8	Marmorverwitterung und Konservierung	27
3	Herkunftstypische Merkmalsmuster von Marmoren und Methoden zu ihrer Bestimmung	30
3.1	Abhängigkeit der Untersuchungsmethoden von der Möglichkeit der Probennahme im Museum und Gelände	30
3.2	Petrographisch-mineralogische Merkmale	32
3.2.1	Äußere Merkmale - Makroskopische Untersuchungen	32
3.2.2	Mikroskopisch bestimmbare Merkmale.....	34
3.2.2.1	Polarisationsmikroskopie	35
3.2.2.2	Auflichtmikroskopie	35
3.2.2.3	Mineralbestand.....	35
3.2.2.4	Gefügemerkmale.....	35
3.2.3	Pulverdiffraktometrie (XRD).....	38
3.2.4	Elektronenspinresonanzspektroskopie.....	38
3.2.5	Kathodolumineszenz (KL).....	39
3.3	Geochemische Merkmale.....	40
3.3.1	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA).....	40
3.3.2	Bestimmung des Ca/Sr-Verhältnisses.....	40
3.3.3	Instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse.....	40
3.3.4	Spektrometrische Elementbestimmung.....	41
3.4	Stabile Isotope.....	43
3.4.1	Entwicklung der Methode für die Marmorcharakterisierung	43
3.4.2	Sr-Isotopie.....	44
3.4.3	Geochemische Grundlagen	44
3.4.4	Isotopenvariationen bei Karbonaten	45
3.4.5	Verwitterungseinflüsse.....	48
3.4.6	Zusammenfassung.....	49
4	Eingesetzte Methoden und Merkmale zur Charakterisierung der Marmore.....	50
4.1	Überblick der Beobachtungen in antiken Stätten und Steinbrüchen	50
4.2	Probennahme im Gelände und Museum	51
4.2.1	Restaurierungsarbeiten.....	53
4.3	Makroskopische Untersuchungen - Äußere Merkmale	53

4.4	Mikroskopische Untersuchungen und Merkmale	55
4.4.1	Bilddarstellungen	56
4.4.2	Korngefüge.....	56
4.4.3	Bestimmung des Mineralbestands mit Dünnschliffen und Anschliffen	60
4.4.3.1	Abhängigkeit Alizarin Rot von Schnittlage.....	60
4.5	Bestimmung von Calcit, Dolomit und Quarz mittels Pulverdiffraktometrie.....	60
4.6	Geochemische Untersuchungen mittels ICP-MS und ICP-OES.....	63
4.6.1	Seltenerdelemente – Verteilungsmuster und Relevanz für die Marmorcharakterisierung.....	65
4.6.2	Geowissenschaftliche Interpretation der SEE-Verteilungsmuster.....	68
4.6.3	Mögliche Korrelationen der SEE mit akzessorischen Mineralen und deren Elementen 70	
4.7	Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopie	76
4.8	Elementkorrelationen und Verteilungsmuster	80
4.9	Fehlende Werte	83
4.10	Faktorenanalyse	83
4.11	Elektronenspinresonanzspektroskopie (ESR) und Kathodolumineszenzanalyse (KL)	85
4.11.1	Kathodolumineszenz-Bildtafel.....	88
4.12	Geruchsbestimmung, Gaschromatographie	90
5	Herkunftsrelevante Merkmalsbündel der untersuchten Marmore	92
5.1	Geochemische Eigenschaften	92
5.1.1	Dolomit und Quarz	95
5.1.2	Seltenerdelemente SEE	96
5.1.3	Ba, Zn, Sr, Fe, Mn.....	96
5.1.4	Bivariate Diagramme	96
5.2	Clusteranalyse (CA).....	98
5.3	Diskriminanzanalyse (DA)	100
5.4	Petrographische Lagerstättenmerkmale mit höherer Signifikanz und Beispiele ihrer multivariaten Diskriminierung.....	104
5.4.1	Buntmarmore	104
5.4.2	Gestreifte bis gebänderte Marmore.....	104
5.4.3	Fein-, mittel- und grobkörnige Marmore	104
5.4.4	Heterogenes – homogenes Korngefüge	107
5.4.5	Dolomitische Marmore	107
5.4.6	Lagerstätten mit starker Geruchsbildung.....	109
6	Wichtige Marmorlagerstätten, ihre Randbedingungen und Charakteristika.....	110
6.1	Marmara (Prokonnesos).....	110
6.1.1	Geologischer Überblick	113
6.1.2	Merkmale prokonnesischer Marmore	114
6.2	Thasos	124
6.3	Lesbos (Moria).....	126
6.4	Mäandertalregion: Geomorphologie, Geologie, Lagerstätten, Eigenschaften und Verwendung von Marmor und anderen Werksteinen.....	131
6.4.1	Geomorphologische Entwicklung.....	131
6.4.2	Geologischer Überblick der Mäandertalregion.....	132
6.4.3	Überblick beprobter Marmorlagerstätten der Menderesregion.....	135
6.4.4	Die Marmore am Ostufer des Bafasees (Herakleia, Milet Ost und West).....	136
6.4.4.1	Geochemische Merkmale.....	139
6.4.5	Euromos	142
6.4.6	Burgass Adasi	144
6.4.7	Priene	145
6.4.8	Milas	148

6.4.9	Stratonikeia: Stadt und Steinbrüche.....	150
6.4.10	Muğla - Yatağan	154
6.4.11	Aphrodisias	154
6.4.12	Afyon-Dokimeia	158
6.5	Marmorlagerstätten des Attisch-Kykladischen Komplexes.....	159
6.5.1	Ephesos	159
6.5.1.1	Geologische Situation	159
6.5.1.2	Werksteine im antiken Ephesos	160
6.5.1.3	Marmorsteinbrüche bei Ephesos und ihre Merkmale	162
6.5.2	Phourni (bei Samos, vgl. 7.12).....	165
6.5.3	Samos, Agathonisi und Icaria	167
6.5.4	Kykladeninseln Paros und Naxos	169
6.5.4.1	Allgemeine Geologische Situation.....	171
6.5.4.2	Merkmale der Paros- und Naxos-Marmore	172
6.5.5	Pentelikon.....	176
6.5.6	Hymettos	177
6.6	Carrara.....	178
6.7	Wunsiedel.....	179
7	Charakterisierung und Herkunftsbestimmung der antiken Marmorartefakte im geologischen und archäologischen Kontext.....	180
7.1	Multivariate Zuordnungstabelle antiker Objekte zu Marmorlagerstätten.....	180
7.2	Isotopie antiker Objekte vorwiegend aus der Mäandertalregion und von Pergamon - Erste Schlussfolgerungen	183
7.3	Milet.....	188
7.3.1	Mi4) Markttor von Milet, Architekturfragmente (ZO Herakleia).....	190
7.3.2	Mi1) Delphinion-Altar: ionisches Kyma, Deckplattenecke, Voluten (ZO MyLS28) 194	
7.3.3	Mi2) Rankenpfeiler vom Nymphäum (ZO Herakleia)	196
7.3.4	Mi3) Rathaus (Schildakroter) (ZO MTW-Hk).....	196
7.3.5	Mi5) Faustinathermen, Dionysos und Satyr (ZO MTW oder Herakleia).....	197
7.4	Myus	197
7.4.1	My1) Mantelträger (ZO Milet West?)	198
7.4.2	My2) Gelagerter (Hermonax) (ZO Penteli?)	198
7.4.3	My3) Wagenrennen-Fries (ZO: MyLS28 = Lagerstätte bei Myus).....	200
7.4.4	Archaische Säulenfragmente, Kapitell (ZO MyLS28 = Lagerstätte bei Myus)	200
7.5	Didyma.....	201
7.5.1	Di1) Frauenkopf einer Columna Caelata vom archaischen Apollontempel) (ZO MyLS28 = Lagerstätte bei Myus)	201
7.5.2	Di2) Archaische Säulenfragmente (Apollontempel, Kapitellfragment) (ZO MTW) 202	
7.5.3	Di3) Archaischer Kouros (ZO MTW?).....	202
7.5.4	Di4) Frontsäule Dodekastylos (ZO Thasos-Aliki).....	203
7.5.5	Di5) Naiskos Apollontempel (ZO HK, MTW).....	203
7.5.6	Di6) Steingarten an N-Seite (Werkplatz) (ZO MTO).....	204
7.6	Magnesia/Mäander (Mg).....	204
7.6.1	Architekturfragmente vom hellenistischem Artemistempel	205
7.6.2	Relieffragment vom Altar des Artemisions	211
7.7	Pergamon: Hellenistische und römische Großprojekte.....	213
7.7.1	Geologische Situation Pergamons und infrage kommende lokale Gesteine.....	213
7.7.2	Kozak (N-Bergama).....	214
7.7.2.1	Granodiorite	214
7.7.2.2	Andesite	216

7.7.3	Diskussion der lokalen Marmorvorkommen.....	216
7.7.4	Kozak-Marmore in Pergamon?.....	217
7.7.5	Marmorverwendung in Pergamon	219
7.7.6	Phänotypische Zuordnung von Gesteinsartefakten auf der Akropolis von Pergamon 220	
7.7.7	Pergamonaltar - Großer Fries (ZO Prokonnesos).....	223
7.7.8	Pergamonaltar - Telephosfries (ZO Prokonnesos).....	224
7.7.8.1	Moderne Ergänzungen.....	225
7.7.9	Demeterempel (Fries) (ZO Prokonnesos).....	228
7.7.10	Tempel Oberer Markt, Geison (hellenistisch) (ZO Prokonnesos).....	228
7.7.11	Kouros (ZO Prokonnesos?).....	229
7.7.12	Athenahallen, Waffenrelief (ZO Lesbos?).....	229
7.7.13	Gebälk des hellenistischen Dionysostempel, Theaterterrasse (ZO Ephesos).....	231
7.7.14	Marmorsaal / Waffenrelief (ZO Hymettos).....	233
7.7.15	Tempel R beim Oberen Gymnasion (römisch) (ZO Thasos-Aliki).....	234
7.8	Ilion-Troja: Athenatempel, Metope (ZO Prokonnesos).....	236
7.9	Ephesos: Hafenthermen (ZO Prokonnesos).....	237
7.10	Athen: Eumeneshalle (Fragment von M. Korres / Athen) (ZO Prokonnesos).....	237
7.11	Priene: Athenatempel Antenbasis (ZO Phourni).....	239
7.12	Samos: Heraion, Säulenfragmente vom 2. Dipteros (ZO Phourni).....	241
8	Marmordiagnosesystem „MarbExpert“	244
9	Verzeichnisse	250
9.1	Abbildungsverzeichnis.....	250
9.2	Tabellenverzeichnis	264
9.3	Literaturverzeichnis	266
10	Anhang.....	296
10.1	Anhangsverzeichnis	296
10.2	Praktische Nutzung von MarbExpert.....	296
10.3	Anzahl von verwerteten Proben aus Lagerstätten und von Museumsobjekten	297
10.4	ICP-MS: A: Bestimmungsgrenzen (BG, µg/g), bezogen auf Feststoff	299
10.5	ICP-MS: B: Blindwert (BW, µg/g), bezogen auf Feststoff	299
10.6	ICP-MS: D: Reproduzierbarkeit der Messung (µg/g) bezogen auf Feststoff.....	301
10.7	ICP-MS: Messwerte von Standards (Carrara Marmor (GFZ) und Limestone (IAG).....	304
10.8	ICP-MS: Driftkontrolle von Proben und GSJ Dolomit-Standard bei Verdünnungsfaktor 1000 und 5000.....	305
10.9	ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000 xl: Blindwerte-, Standard- tw. Probenmessung ...	309
10.10	ICP-OES: Kontrollmessung certif. Wasser-Standard SRM 1640 in Ca-Matrix-Lsg. :312	
10.11	Vergleich GFZ (ICP-MS)-----AWI (ICP-OES) für Ba + Sr.....	313
10.12	Isotopenmessung am AWI: Standard KH-2 und Proben (Auszug)	315
10.13	Korrelationen (PEARSON, 1966) der geochemischen Messwerte.....	317
10.14	Datensätze der Proben mit wichtigsten erfaßten Merkmalen	318
10.15	Zuordnung von Lagerstätten- und Museumsmarmoren durch Diskriminanzanalyse, antike Objekte in Fettdruck.....	329
10.16	Publikationsliste.....	332
10.17	Curriculum vitae	333

Einleitung

1 Von den Artefakten der Antikensammlung zur Charakterisierung ihrer Marmorlagerstätten

Die Antikensammlung Berlin besitzt aus den Ausgrabungskampagnen der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert viele Bruchstücke antiker Skulpturen und Architekturen, die in Berlin zusammengesetzt worden sind. Im Zusammenhang mit Restaurierungsarbeiten konnten erstmals Proben zahlreicher Museumsobjekte für Materialuntersuchungen entnommen werden.

Archäologische Ziele der von der DFG geförderten Untersuchungen waren die Herkunftsbestimmung von Marmoren ausgewählter Grabungsfunde und die Rekonstruktion der Produktions- und Verwendungsgeschichte von Marmoren in den Regionen von **Pergamon** und dem **Mäandertal**. Museologisches Ziel war die verbesserte Materialkenntnis hinsichtlich der Restaurierungsarbeiten.

Schwerpunktmäßig werden in der vorliegenden Arbeit einerseits die Marmorobjekte der Antikensammlung und andererseits relevante **Marmorlagerstätten geowissenschaftlich charakterisiert** und - wo möglich - mittels eines multivariaten Ansatzes auch so korreliert, dass eine widerspruchsfreie **Zuordnung** und damit Herkunftsbestimmung erfolgen kann. Letzteres ist aber nur dann sinnvoll zu leisten, wenn die Verwendung des Geomaterials Marmor in der Antike auch unter archäologischen, infrastrukturellen und logistischen Gesichtspunkten betrachtet wird. Deshalb kommt trotz der geowissenschaftlichen Schwerpunktsetzung der interdisziplinäre Ansatz immer wieder zum Tragen. Dies erlaubte unter Einbeziehung von Geländearbeiten und Materialuntersuchungen, die Wissensbasis über herkunfts-verwendungstypische Marmormerkmale zu erweitern und gleichzeitig die Methoden zur Charakterisierung und Identifizierung von Marmoren zu verbessern.

Auf dieser Grundlage konnte ein zentrales methodisches Ziel erreicht werden: durch Integration multivariater geowissenschaftlicher und archäologischer Kriterien ein Marmordiagnosesystem zu entwickeln, das auch Nichtgeowissenschaftlern Entscheidungshilfen für die Marmorherkunftsbestimmung zur Verfügung stellt.

Dank früherer Provenienz- und Lagerstättenuntersuchungen unter Leitung von Professor Klaus Germann in Griechenland und Kleinasien war am Institut für Lagerstättenforschung der Technischen Universität Berlin bereits ein beträchtlicher Kenntnisstand zur Charakterisierung und Verwendung von Marmoren in der Antike vorhanden sowie Probenmaterial aus verschiedensten Lagerstätten angesammelt worden. Der Autor selbst konnte hierauf zurückgreifend in seiner 1996 fertiggestellten Diplomarbeit (CRAMER 1998) eine erste Charakterisierung der Marmore des zum Pergamonaltar gehörigen Telephosfrieses vornehmen, wobei die damals geäußerte Vermutung¹ einer prokonnesischen Herkunft (von der Insel Marmara im türkischen Marmarameer, s. Karte S. 51) sich unterdessen als zutreffend erwiesen hat.

Die Restaurierung des Telephosfrieses war nur der Anfang einer großangelegten und dringend erforderlichen Restaurierungskampagne an zahlreichen Museumsobjekten, die die unkomplizierte Entnahme weiteren Probenmaterials erlaubte. Ermuntert durch die Ergebnisse der Untersuchung des Telephosfrieses zeigten die Verantwortlichen der Antikensammlung ein großes Interesse an der Herkunftsbestimmung, so dass trotz konservatorischer Vorbehalte für spezielle Fragen auch gezielt Probenmaterial an verdeckten Stellen antiker Objekte entnommen werden konnte. Nach der Bewilligung eines von Klaus Germann und Wolf-Dieter Heilmeyer beantragten Forschungsprojekts durch die DFG konnten ab August 1999 die Arbeiten aufgenommen werden.

Aus archäologischer und museologischer Sicht und unter Berücksichtigung der geologischen Situation wurden zwei Untersuchungskomplexe ausgewählt:

- A. Die Skulptur und Architektur der hellenistischen Zeit aus Pergamon und ihre Vergleichsobjekte aus der Region B.
- B. Skulptur und Architektur der archaischen Zeit aus den Städten des unteren Mäandertals (Magnesia, Myus, Priene, Milet, Didyma).

¹ Die damalige Vermutung stützte sich lediglich auf - teilweise widersprüchliche - Literaturangaben, da Vergleichsmaterial von der Insel Marmara noch nicht zur Verfügung stand.

Daneben wurden Proben weiterer antiker Objekte untersucht, so von Samos, Ephesos, Troja, Athen und aus dem British Museum in London. Auch einige antike Probenfragmente aus früheren Untersuchungen wurden einbezogen, teilweise um Messwerte und Zuordnungen zu überprüfen, teilweise um die eigene Datenbasis zu erweitern.

Zwei mit Archäologen der Berliner Antikensammlung² gemeinsam durchgeführte Surveys zu antiken Stätten und Steinbrüchen in beiden westanatolischen Untersuchungsgebieten erbrachten ein vertieftes Verständnis der Museumsobjekte in ihrer ursprünglichen Umgebung sowie eine reiche Ausbeute an Probenmaterial aus relevanten Marmorsteinbrüchen.

Letztere verschaffen zusammen mit bereits früher unter der Leitung von Klaus Germann gesammelten Marmorproben von den Kykladeninseln, dem griechischen Festland, Kleinasien und anderen Regionen des Mittelmeerraumes einen – wenn nicht vollständigen so doch aussagekräftigen – Überblick über in Frage kommende Marmorlagerstätten. Dank dieser erweiterten Datenbasis war es möglich, die Artefakte nicht nur geowissenschaftlich zu charakterisieren, sondern auch fast vollständig ihren wahrscheinlichen Lagerstätten zuzuordnen.

1.1 Was ist und wofür dient Archäometrie?

Der folgende Auszug aus einem Online-Lexikon verdeutlicht die Breite archäometrischer Ziele und Methoden (**LEXIKON DER GEOWISSENSCHAFTEN 2004**): **Archäometrie**, dieser Begriff beinhaltet Forschungen, die zum Ziele haben, Material und Herstellungstechniken der in der Menschheitsgeschichte gefertigten Kultur- und Gebrauchsgüter kennenzulernen. Da es sich bei den Objekten der Bearbeitung vorwiegend um Gesteinsmaterialien, Keramiken, Gläser, Pigmente, Metalle und Schlacken, aber auch um Gewinnungsverfahren der Rohstoffe zur Herstellung antiker Gegenstände handelt, haben die klassischen und modernen mineralogischen Untersuchungsmethoden einen wesentlichen Anteil an der Archäometrie als einem Forschungsgebiet der Angewandten Mineralogie. Ein zentrales Thema der archäometrischen Forschung ist neben der Identifizierung der Werkstoffe, aus denen kulturgeschichtliche Objekte hergestellt sind, die Datie-

rung, d.h. die zeitlich richtige Einordnung antiker Funde in eine relative oder absolute Zeitskala. Weitere archäometrische Aufgaben für die Mineralogie sind Untersuchungen von Pigmenten der antiken Malerei, der Münzmetalle und der Legierungen von metallischen Werkstoffen, die Ermittlung der Rohstoffquellen antiker Keramiken und Baustoffe, z.B. von Marmor, Probleme der Steinkonservierung im Rahmen der Erhaltung von Baudenkmalern, die Untersuchung von Steinschäden durch Umwelteinwirkungen, Echtheits- und Herkunftsprüfungen von Kunstgegenständen aus Keramik oder Stein sowie die Restaurierung und Konservierung von Museumsobjekten. [GST].

1.2 Ziele und Voraussetzungen der Provenienzanalyse

Die spezifischeren Voraussetzungen und Ziele der Herkunftsbestimmung von Natursteinen sind im folgenden Auszug zusammengefasst (GERMANN & CRAMER in press):

Die Herkunftsbestimmung (oder Provenienzanalyse) von Naturwerksteinen verfolgt die Absicht, die in Architektur und Skulptur verwendeten natürlichen Materialien ihren primären Lagerstätten bzw. Liefergebieten zuzuordnen. Antworten auf die Frage nach der Herkunft von Gesteinen können sehr vielfältigen und unterschiedlichen Zwecken dienen: Der Archäologe wird in die Lage versetzt, daraus etwa politische und wirtschaftliche Beziehungen abzuleiten oder Fälschungen und Kopien nachzuweisen, für die Architektur- und Baugeschichte werden zeitliche, räumliche oder auch technologische Entwicklungen erkennbar, und dem Restaurator werden Hinweise auf Steineigenschaften und für den Steinaustausch gegeben. Im letzteren Falle rückt dann die Herkunftsfrage gegenüber der anwendungsorientierten Gesteinscharakterisierung in den Hintergrund.

Die für die Provenienzanalyse verwertbaren Beziehungen zwischen Natursteinbauwerken oder sonstigen Natursteinprodukten und den Liefergebieten bzw. den Lagerstätten des Steins sind unterschiedlicher Natur (Abbildung 1). Sie beruhen einerseits auf dem entstehungsabhängigen petrographischen, mineralogischen und chemischen Eigenschaftsspektrum des Gesteins - einschließlich der daraus resultierenden äußeren Gesteinskennzeichen wie Farbe, Muster sowie den gesteinsphysikalischen Eigenschaften - zum anderen aber auch auf Merkmalen im Zusammenhang mit der Größe und der Struktur der Lagerstätten, von denen die Menge des verbauten Gesteins so-

² Wolf-Dieter Heilmeyer und Volker Kästner

wie Größe und Form der zu fertigenden Bau- oder Skulpturelemente bestimmt werden.

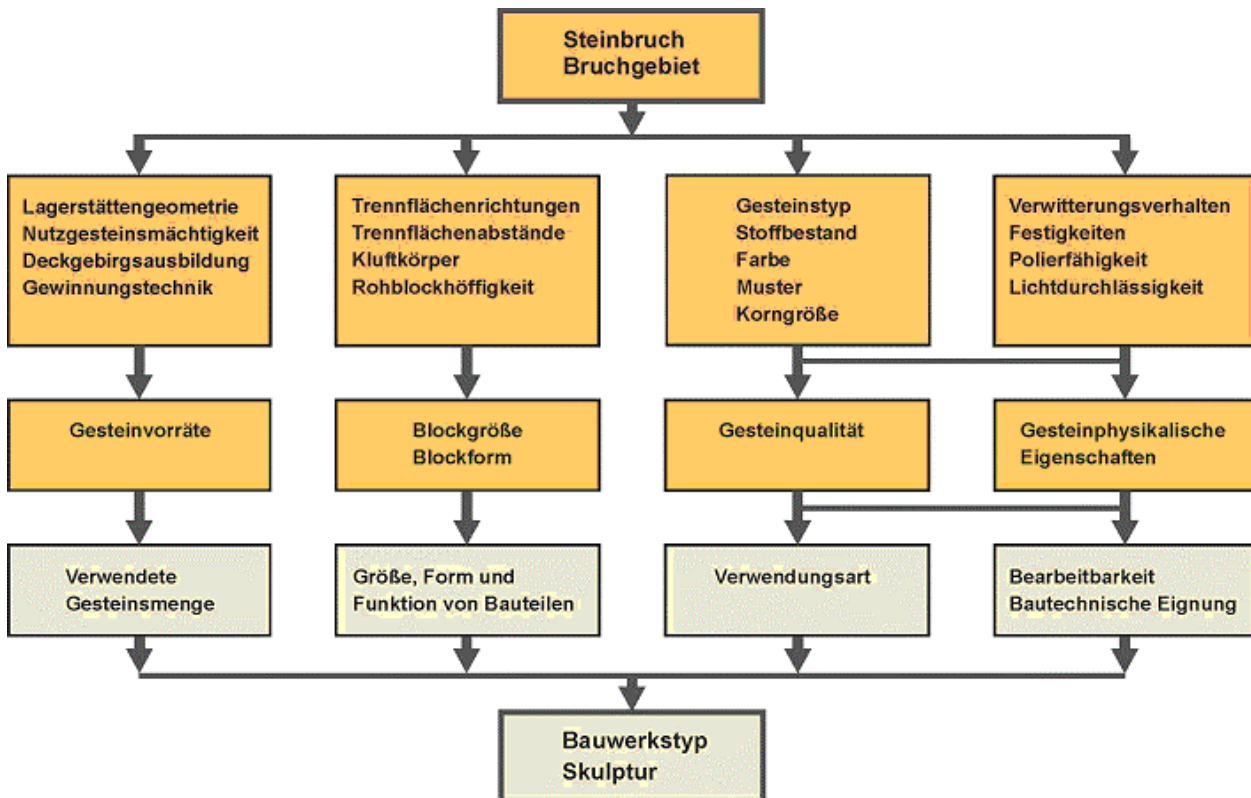


Abbildung 1: Zusammenhänge zwischen dem Naturwerkstein im Bauwerk/Artefakt und im Steinbruch bzw. Bruchgebiet (GERMANN & CRAMER in press)

Für Bauwerke und bildhauerische Arbeiten in jüngerer Zeit verwendete Naturwerksteine sind in aller Regel auch nach Art und Herkunft gut dokumentiert. Dabei werden Auswahl und vergleichende Zuordnungen durch umfangreiche Datenbanken erleichtert (MÜLLER 1984-1998; FUCHS 1997; MARBLE INSTITUTE OF AMERICA 1997, 1999; ICONS 2000; BÖRNER & HILL 2002; QUICK 2002). Demgegenüber kann die Bedeutung archäologischer Objekte³ zwar auch aus historischer Literatur häufig erschlossen werden, aber für die verwendeten Gesteine und ihre Bezugsquellen ist die Quellenlage äußerst dürftig. Da sich der Bergbau in der Antike zudem empirisch entwickelte, folgen auch die gelegentlichen Beschreibungen (Strabo, Vitruv, Plinius etc.) einer vollkommen anderen Systematik und Nomenklatur als heute. So muss sich die Provenienzanalyse im Wesentlichen moder-

³ Auch für archäologische Objekte werden unterdessen umfangreiche Datenbanken entwickelt (z.B. BERGEMANN 2002), von denen einige auch die verwendeten Materialien erfassen (z.B. KNOWLES *et al.* 2003) und häufig im Internet zur Verfügung stehen, so auch die im Aufbau befindliche der Berliner Antikensammlung.

ner naturwissenschaftlicher Methoden bedienen, bei denen aufgrund der Komplexität des Geomaterials im antiken Objekt und Lagerstätte geowissenschaftliche Verfahren im Vordergrund stehen.

Seit dem Paläolithikum spielen Werksteine für die Entwicklung menschlicher Gesellschaften eine fundamentale Rolle, und spätestens mit Anbruch des Neolithikums fanden begehrte Materialien wie Obsidian oder Bernstein über die frühesten Handelsrouten auch eine überregionale Verbreitung. Beispielsweise finden sich selbst chalkolithische Marmorartefakte (Mitte des 5. Jahrtausends v.u.Z.) aus Kulaksizlar in ganz Westanatolien. (TAKAOGLU 2001).

Aber von allen Werksteinen sind die in der griechischen und römischen Antike verwendeten Marmore die am besten erforschten. Die Gründe sind einleuchtend:

1. Sie sind aufgrund der geologischen Rahmenbedingungen im gesamten Mittelmeerraum allgemein verfügbar gewesen, für die selteneren hochwertigen Qualitäten entwickelten sich jedoch seit dem 6. Jh. v.u.Z. ca. 20 Abbauzentren.

2. Aufgrund ihrer relativ geringen Härte (3 in der 10-teiligen Mohs'schen Härteskala) und Homogenität, der hieraus resultierenden leichten Bearbeitbarkeit und Polierfähigkeit sowie sonstiger Merkmale (meist weiße Farbe, Transluzenz, einfache Gewinnung) standen sie bei griechischen und römischen Baumeistern und Bildhauern hoch im Kurs, so dass ohne Übertreibung von der Entstehung einer Marmorkultur gesprochen werden kann.
3. Diese homogenen Merkmale sind zugleich dafür verantwortlich, dass ihnen die Lagerstättenherkunft meist nicht mittels einfacher „Steckbriefe“ nach äußeren Merkmalen angesehen werden kann, bzw. solche erst einmal erstellt werden mussten. Erschwerend kommt hinzu, dass viele der antiken Marmorlagerstätten im schlimmsten Fall erschöpft oder bisher unbekannt geblieben sind.
4. Die große Bedeutung der griechischen und römischen Antike für die Moderne veranlasste seit den petrographischen Arbeiten von Lepsius (1891) zahlreiche Naturwissenschaftler, unter Einsatz der jeweils aktuellen Analytik ihren Beitrag zur Erforschung dieser Epoche zu leisten, insbesondere wenn entsprechende Ressourcen zur Verfügung gestellt wurden.

Voraussetzung für die erfolgreiche Provenienzanalyse von Marmoren ist, dass Marmorlagerstätten bestimmte unverwechselbare Merkmale aufweisen, in denen sich ihr komplexer Bildungsprozess widerspiegelt. Leider konnte jedoch – anders als bei der DNA-Analyse oder der Erfassung biometrischer Daten zur sicheren Identifizierung eines Individuums aus einer Milliarden Köpfe zählenden Population – auch die modernste Analytik keinen auf ein Merkmal alleine gestützten „fingerprint“ zur unzweideutigen Identifizierung einer unter ein paar dutzend in Frage kommenden Lagerstätten zur Verfügung stellen. Die Überlappung von Merkmalen besonders bei den weißen, homogenen Marmoren ist zu groß.

Trotzdem ist die Charakterisierung dieser Marmore zur Herkunftsbestimmung antiker Objekte kein hoffnungsloses Unterfangen. Es kann aber nur gelingen, wenn ein ganzes Bündel von Ein-

zelmerkmalen erfasst und verglichen wird. Hierzu gehören Kenntnisse über materialinhärente Merkmale, die aus der Sedimentations- und Metamorphosegeschichte der Lagerstätte resultieren (Klüftungen und maximale Blockgrößen, Petrographie, Mineralogie, Isotopie, Chemismus und aus diesen abgeleitete Merkmale wie ESR- und Lumineszenzspektren; vgl. Abbildung 367).

Doch kann die naturwissenschaftliche Herkunftsbestimmung nicht in Art einer „black box“ erfolgen, in die analytische Daten eingegeben werden und aus der unfehlbare Zuordnungsergebnisse herauskommen. Ein solches Vorgehen kann nur das Vertrauen von Archäologen in die Archäometrie erschüttern, sobald sich einige Zuordnungen als nicht sinnvoll erweisen.

Deshalb sind auch die Berücksichtigung von large-scale-Gesichtspunkten für eine sichere Zuordnung unverzichtbar: Abbauvolumen und -zeitraum der Marmorlagerstätten, logistische Aspekte (Nähe zum antiken Objekt, Reichweite überregionaler Lagerstätten, Transportmöglichkeiten der Blöcke und Artefakte über See- oder Landweg, Existenz und Verwendung lokaler Marmorquellen), Einfluss bestimmter Bildhauerschulen und Werkstätten, Herkunft der Baumeister und ihr Erfahrungsschatz, politische Verhältnisse, Bedeutung der antiken Objekte für die jeweiligen Auftraggeber sowie deren finanzielle Ressourcen usw. Gerade die letzten Aspekte können nur in enger Zusammenarbeit zwischen Geowissenschaftlern, Archäologen und anderen Fachleuten geklärt werden – wobei häufig archäometrische Untersuchungen ja gerade helfen sollen, diese Fragen detailliert aufzuklären.

Folglich ist die Provenienzanalyse in hohem Maße auf Interdisziplinarität angewiesen, und zumindest eine rudimentäre Kenntnis und Austausch der jeweiligen Methoden und Fragestellungen sind unverzichtbar.

2 Untersuchungsgegenstand

2.1 Marmorartefakte der Antikensammlung – Kurze Übersicht

Für die archäometrische Charakterisierung musste sich auf eine kleine, zumeist vorrömische Auswahl der zahlreichen Museumstücke der Antikensammlung beschränkt werden, die

überwiegend aus den beiden **Hauptuntersuchungsgebieten** stammen (s. Karten S.51):

- a. **Unteres Mäandertal:** Von den mit Ausstellungsstücken in der Berliner Antikensammlung vertretenen Objekten aus dem unteren Mäandertal (Milet, Didyma, Myus, Magnesia, Priene) wurden folgende antike Plastiken und Architekturelemente untersucht:
Myus: Mantelträger, Gelagerter, Wagenrennen-Fries sowie archaische Säulenfragmente
Milet: Architekturfragmente vom Rathaus, Marktort, Rankenfeiler des Nymphäons

Daneben diverse Architekturfragmente aus **Didyma, Magnesia und Priene**.

- b. **Pergamon:** In Fortsetzung der Untersuchung des Telephosfrieses standen in Pergamon Marmore hellenistischer und römischer Großprojekte im Vordergrund. Die Karte zur Ausdehnung des Pergamenischen Königsreichs (Abbildung 2) verdeutlicht die Relevanz der genaueren Charakterisierung der im Zentrum dieser bedeutenden Regionalmacht verwendeten Werksteine.

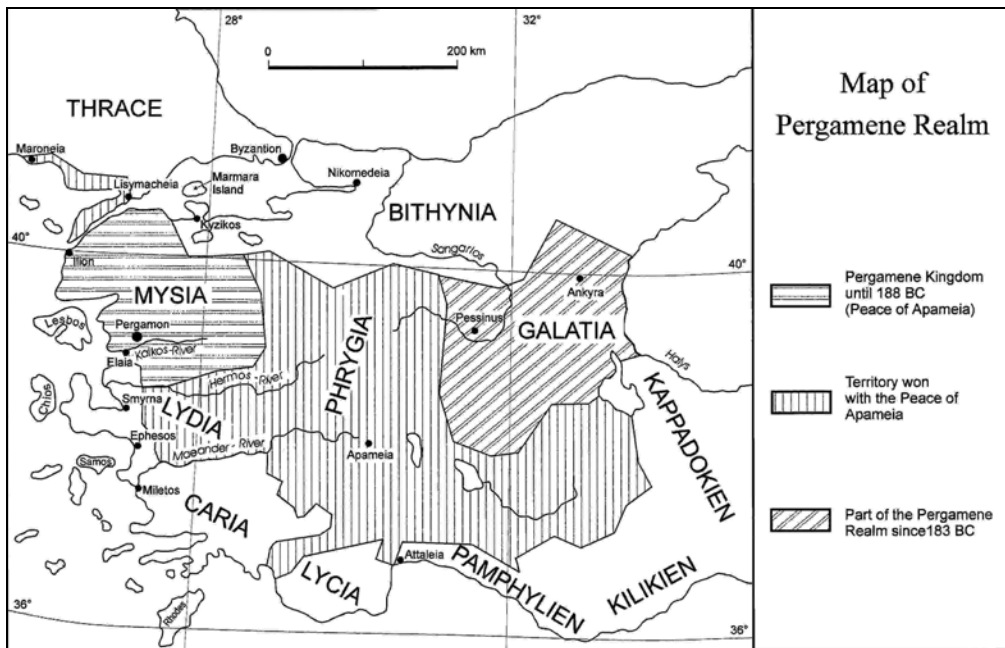


Abbildung 2: Karte zur Ausdehnung des Herrschaftsgebietes des Pergamenischen Königreiches (nach RADT & STEINER 1988)

Am bekanntesten ist der unter Eumenes II errichtete **Pergamonaltar** (Abbildung 3), von dem verschiedene Architekturteile beprobt wurden.



Abbildung 3: Pergamonaltar im Berliner Pergamonmuseum

Daneben wurden Proben vom Gebälk des **Dionysostempels**, des **Athenaheiligtums**, des **hellenistischen Tempels am Oberen Markt**, das Fragment einer **archaischen Kore** sowie des **Waffenreliefs im Marmorsaal** analysiert. Zwei Geländebegehungen zu Projektbeginn und am Projektende erlaubten eine präzisere Einordnung der verwendeten Werksteine.

- c. Weitere Vergleichsproben wurden zur unterdessen bestätigten Feststellung möglicher Verbindungen mit den beiden Hauptuntersuchungsgebieten herangezogen. Sie stammen von vier antiken Stätten:

Ilium-Troja: Athenatempel,
Ephesos: Kapitell d. Hafenthermen,
Athen: Eumenes-Halle,
Samos: Heraion.

2.2 Geologischer Rahmen der Marmorlagerstätten im östlichen Mittelmeerraum und westlichen Kleinasien

Als Ergebnis zahlreicher Untersuchungen seit 1890 kann unterdessen als gesichert angesehen werden, dass die überregional bedeutsame Gewinnung von Marmor seit der frühhellenistischen Antike auf den Kykladeninseln (Paros, Naxos) begann, um sich dann über Attika und Thasos, Kleinasien, Nordgriechenland und Car-

rara bis nach Nordafrika und in die Pyrenäen auszudehnen. Viele dieser Marmorvorkommen wurden in den letzten 30 Jahren auch von verschiedenen Arbeitsgruppen unter Leitung von Klaus Germann genauer untersucht (Abbildung 4). Dabei hat sich bestätigt, dass ein Verständnis der geologischen Rahmenbedingungen für die Entstehung sowohl der Marmorlagerstätten als auch der antiken Hochkulturen im Mittelmeerraum unverzichtbar ist.



Abbildung 4: Überblick über die 1975-2000 von der Arbeitsgruppe GERMANN untersuchten Marmorlagerstätten (unterlegt) im östlichen Mittelmeerraum

Diese Rahmenbedingungen werden zunächst anhand eines Auszugs aus dem Beitrag „Werksteine der Antike im Spannungsfeld von Geologie, Materialeigenschaften und Verwendung“ (CRAMER 2004) skizziert:

„Einer der ausschlaggebenden Prozesse für die Gestaltung und Zergliederung des heutigen mediterranen Umfelds⁴ ist die langsame Drift der afrikanischen Platte auf den eurasischen Kontinent zu. Das vor 190 Millionen Jahren weite Gebiete Europas und Afrikas bedeckende Tethys-Meer mit seinen mächtigen Kalkablagerungen wurde seitdem auf das vergleichsweise winzige heutige Mittelmeer eingeschnürt, wäh-

rend der Superkontinent Pangea vom sich öffnenden Atlantik auseinandergerissen wurde. Kompression schob ozeanische und kontinentale Landmassen übereinander und faltete sie. Seitwärtsbewegungen und Streckung führten zu Graben- und Horstbildungen, tiefreichenden Störungen, Aufstieg von Magmen. Gebirge türmten sich auf, um mit ihren Erosionsprodukten die tieferen Becken wieder aufzufüllen. An den Nordrändern entstanden schließlich Gebirgszüge, die heute von den Pyrenäen über die Alpen bis über die Karpaten reichen und auch in den kristallinen Komplexen des Menderes-, Kirshehir- und Bitlis-Massives ihre Ausläufer finden. Noch heute aktive Zeugen dieser hier sehr vereinfacht dargestellten plattentektonischen Ereignisse sind Erdbeben und Vulkanausbrüche, die ganze Städte und Reiche bedrohten oder gar auslöschten, geschickte bauliche Maßnahmen veranlassten, wahre Völker-

⁴ Eine leicht verständliche Übersicht mit umfangreicher Literatur geben HIGGINS & HIGGINS (1996) in „A Geological Companion to Greece and the Aegean“.

südlich durch die Lykischen Decken begrenzten Flanke befindet sich ein langes Band regional-metamorpher Marmorlagerstätten, die - oft als Milas-Marmore bezeichnet - von der Bafa-See-

Region bis nach Aphrodisias und darüber hinaus reichen. Sie bilden einen regionalen Schwerpunkt dieser Untersuchung.

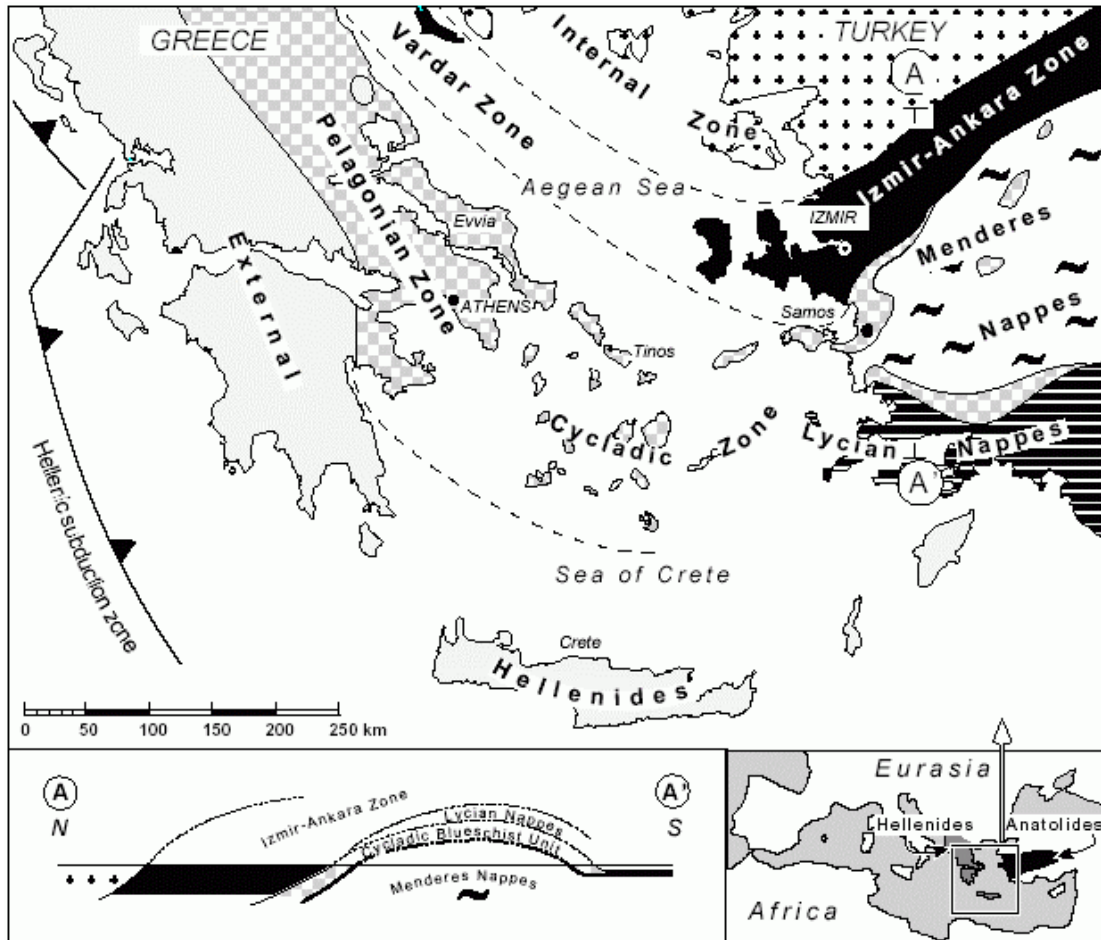


Abbildung 5: Die tektonometamorphen Haupteinheiten der Orogengürtel von Helleniden und Anatoliden (GESSNER 2000)

Nördlich von diesem Gürtel erstrecken sich die Vardar Zone und in ihrer Verlängerung die Izmir-Ankara Zone, beide ohne nennenswerte Marmorlagerstätten. Anders verhält es sich bei der in Abbildung 5 als Internal Zone bezeichneten Region. In deren südlichen Saum liegen u.a. Pergamon (archäologischer Schwerpunkt ohne eigene Marmore) und besonders die niedrig- bis mittelmetamorphen Marmorvorkommen von Moria im Südosten der Insel Lesbos. Eine detailliertere Untergliederung der Internen Zone in das Rhodope Massiv (DINTER 1998), die Saka-

rya Zone und die Pontiden zeigt Abbildung 6 und wird anschließend besprochen. Sie wird auch als Pontidisches Bogensystem (SENGÖR & YILMAZ 1981) des Hellenidisch-Anatolischen Orogens bezeichnet. Die mächtigen Marmorvorkommen von Marmara – zweiter regional-geologischer Schwerpunkt dieser Arbeit – gehören der Sakarya-Zone an, in der auch weitere bedeutende Marmorlagerstätten liegen. Im sich nordwestlich erstreckenden Strandja Massiv (BARR *et al.* 1999) sind insbesondere die Vorkommen auf der Insel Thasos zu erwähnen.

2.4 Regionaler Überblick der Türkei

Im größten Teil der Türkei nehmen die geotektonischen Haupteinheiten einen ungefähr E-W-Verlauf an. Auch sie sind aus unterschiedlichsten kontinentalen Fragmenten hervorgegangen, die seit dem Alttertiär durch die Kollision der Eurasischen, Afrikanischen und Arabischen Platten im Zuge der Alpenin Orogenese entlang

der Neotethys zusammengefügt wurden (BOZKURT & OBERHÄNSLI 2001). Es handelt sich insbesondere um:

1. Die Pontiden im Norden
2. Die Anatoliden im Zentralteil
3. Die Tauriden im Süden und Südosten
4. Die Zwischen-Gebirge im äußersten Südosten

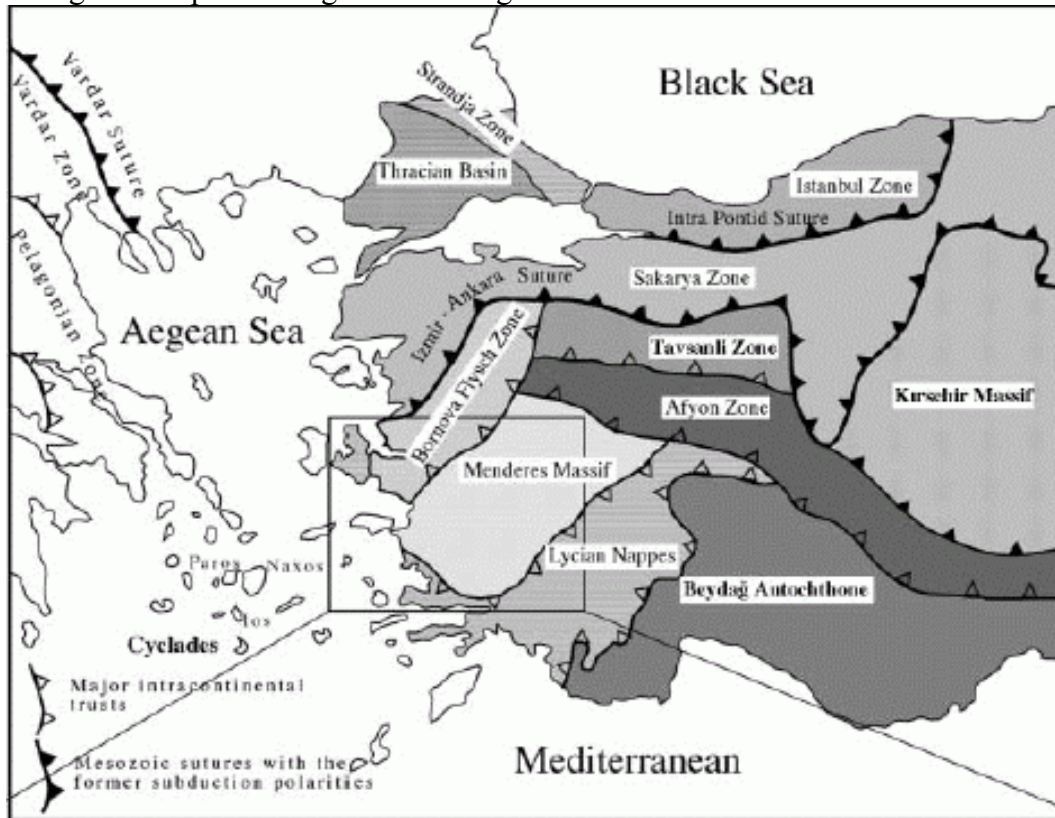


Abbildung 6: Tektonische Karte der W-Türkei und Ägäis nach OKAY et al. (1996) aus KORALAY et al. (2001)

Die Grenzen dieser alten Kontinentalfragmente werden durch verschiedene Suturen markiert, die sich über die Ägäis nach Griechenland fortsetzen. Es handelt sich u.a. um die Intra-Pontidische Suture, die IZmir-Ankara Suture, die Inner-Tauridische Suture und die Vardar Suture.

Die ausgesprochen komplizierte geologische Geschichte des gesamten Raumes ist noch keineswegs vollständig verstanden, was in den letzten Jahren besonders für den türkischen Teil zu neuen Forschungsergebnissen, Grenzziehungen, Kontroversen und einer Vielzahl unterschiedlicher Terminologien geführt hat. Ein Überblick findet sich z.B. bei BOZKURT & OBERHÄNSLI (2001).

Von den vier kristallinen Hauptkomplexen der Türkei (BRINKMANN 1976) gehören das Istranca-Massiv den Pontiden, das Menderes- sowie das Kırşehir-Massiv den Anatoliden und das Bitlis-Massiv den Tauriden an.

2.4.1 Pontiden

Das **Istranca-** oder **Strandja-Massiv** in Thracien bildet den nordwestlichsten Teil der Pontiden. Es setzt sich entlang der Schwarzmeerküste und nach NW in das Rhodope-Strandja-Massiv fort und besteht aus paläozoischen und frühmesozoischen Sedimenten, foliierten Graniten und Gneisen, grünschieferfaziellen Gesteinen des Oberjura und Vulkaniten. Auch die Marmorlagerstätten von Thasos gehören ihr an. Weitere Subzonen der Pontiden sind die **Istanbul-Zone** (präkambrisches Basement aus Amphiboliten, Metadioriten und Glimmerschiefern, das durch nicht metamorph deformierte altpaläozoische und eozäne Sedimente überdeckt wird) sowie die **Sakarya-Zone**. Letztere reicht vom „Sakarya-Kontinent“ (SENGÖR & YILMAZ 1981) bis zu den Ostpontiden. Ihr permotriassisches Basement bilden granitische und metamorphe Gesteine, letztere mit Amphibolit- bis Granulit-Fazies

(OKAY *et al.* 1996). Auf der Biga-Halbinsel mit Kalkschiefern, Metaquarziten, Schiefen und Serpentiniten sind auch Marmore verbreitet, u.a. bei Karabiga, Ayazma, Yeniçe, Bergaz, Serhat und Altinoluk (ZÖLDFÖLDI & SATIR 2002). Der dem paläozoischen Basement tektonisch aufliegende Karakaya-Komplex weist u.a. in Metabasiten⁶ eingeschaltete Phyllite sowie bedeutende, noch heute im Abbau stehende permo-triassische Marmorlagerstätten meist in Grünschieferfazies auf, die teilweise aber auch eine Hochdruck-Metamorphose durchlaufen haben: Manyas (AKYUZ & OKAY 1998), Mustafa Kemalpaşa, Bandirma und besonders Marmara, das frühere Prokonnesos (s. Kapitel 6.3). Tektonisch werden sie von Grauwacken überlagert.

2.4.2 Anatoliden

Zu den Subzonen der Anatoliden gehören der aus Gneisen und Glimmerschiefern bestehende präkambrische Kern des Menderes-Massivs (s. Kapitel 6.1), nördlich folgen in der Afyon-Bolkardağ-Zone Metaklastite und mesozoische Marmore (mit den grünschieferfaziellen Marmorlagerstätten Afyon und Uşak). Aufgrund ihres geringeren Metamorphosegrades werden sie strukturell als über dem Menderes-Massiv liegend eingeordnet. An sie schließen bis zur Izmir-Ankara Suture glaukophanfazielle vulkanosedimentäre mittelkretazische Gesteine der Tavşanlı-Zone an. Nach Osten setzen sich die Anatoliden in den Zentralanatolischen Kristallinkomplex u.a. mit dem Kirşehir-Massiv fort, das aus Graniten und HT/LP-Metamorphiten besteht. Den südlichen Abschluss des Menderes-Massivs (Latmos) bilden metasedimentäre „Hüllgesteine“ (DÜRR 1975, 1976; DÜRR *et al.* 1978). Zwar wird diese Terminologie unterdessen in Frage gestellt, aber in dem langen Gürtel mit korundführenden Metakarbonaten (oft als Milas-Marmore bezeichnet) und Glimmerschiefern liegen wichtige antike und auch rezente Marmorabbaugebiete, die weiter unten (Kapitel 6.1) detaillierter behandelt werden: rings um den Bafa-See, über Milas, Yatağan, Muğla bis nach Aphrodisias. Den nördlichen Abschluss des Menderes-Massivs bildet die Bornova-Flysch-Zone mit großen in Grauwacke-Schiefern eingebetteten Kalksteinblöcken. Die

hochdruckmetamorphe Mineralien führenden Gesteine am Westrand des Menderes-Massivs werden unterdessen als Teil der Kykladischen Blauschiefereinheiten den Helleniden zugeordnet.

2.4.3 Tauriden

Südlich des Milas-Marmorgürtels des Menderes-Massivs schließen sich als nördlichster Repräsentant der Tauriden die Lykischen Decken an. Sie bestehen aus einer peridotitischen Überschiebungsdecke und sedimentären Sequenzen, Plattformkarbonaten und Klastiten. Die Tauriden werden aus zahlreichen weiteren Decken meist sedimentären Ursprungs gebildet (u.a. Antalya- und Anlaya-Decken), deren präkambrischer Kern das weit im Osten liegende Bitlis-Massiv darstellt. Den Abschluss der Anatolischen Platte zu den Zwischengebirgen und der Arabischen Platte bildet die Bitlis-Zagros Suture.

⁶ 80 Vol.% triassische mafische Vulkaniteffusiva auf einer Gesamtfläche von 120000 km² in der Nilüfer-Formation (GENC 2004)

2.5 Marmor: Definition, Entstehung, Eigenschaften, Verwendung, Abbau

2.5.1 Calcit-Dolomit

Noch heute werden in Technik und Handel allgemein polierfähige Kalk- und Dolomitgesteine als Marmor bezeichnet. Die Griechen nannten den eigentlichen Marmor *lithos leukos*, das Wort *mármaros* meinte ursprünglich lediglich „großer Felsblock“ und wurde seit römischer Zeit als *marmor*⁷ im obigen weiten Sinn verwendet (BLÜMNER 1875). Mineralogisch-petrographisch sind Marmore hingegen als metamorphe Gesteine mit mehr als 80 Vol.% Calcit und/oder Dolomit definiert. Für ein Verständnis ihrer Eigenschaften und möglicher Methoden der Herkunftsbestimmung ist es deshalb unerlässlich, sich mit ihren Hauptmineralien vertraut zu machen, besonders dem Calcit.

Calcit (CaCO_3) entsteht an der Erdoberfläche meist in Anwesenheit wässriger Phasen durch die Verbindung von Calcium mit Kohlendioxid zu Calciumkarbonat. Schon geringste Änderungen physiko-chemischer Randbedingungen haben enorme Auswirkungen auf seinen Habitus, weshalb er das formenreichste Mineral überhaupt ist (z.B. WEISE 1998).

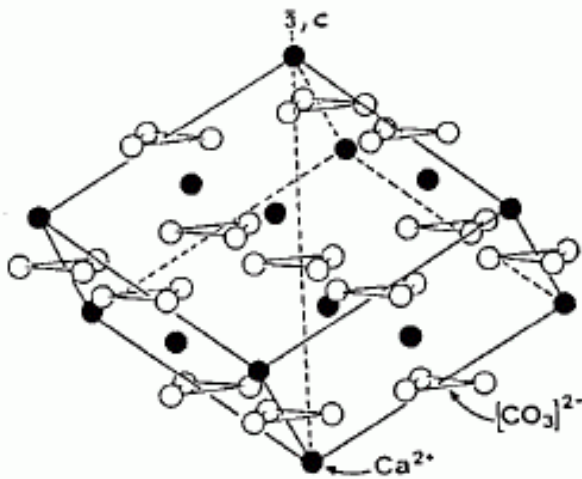


Abbildung 7: Calcitstruktur in Spaltrhomboeder (aus MATTHES 1987)

⁷ Häufig werden auch farbige magmatische Gesteine als Buntmarmore bezeichnet. Dies mag auch im Zusammenhang mit der ursprünglichen griechischen und römischen Bedeutung des Wortes Marmor zu tun haben; so Marmo Troadense oder Marmo Misio für Granite vom westanatolischen Mt. Cigri bzw. dem Kozak.

Er kristallisiert ditrigonal-skalenoedrisch in der Raumgruppe R3c; sein Gitter lässt sich aus einem entlang der Raumdiagonalen gestauchten NaCl-Gitter ableiten, wobei in Richtung der c-Achse CO_3^- - und Ca-Lagen schichtgitterartig aufeinanderfolgen (Abbildung 7).

Calcit ist jedoch nicht die einzige Calciumkarbonatphase. Letztere sind vielmehr polymorph und können sowohl in der Calcit- als auch in der Aragonitstruktur auftreten⁸. Die Herausbildung solcher Strukturen wird in erster Näherung vom Ionenradius der beteiligten Kationen bestimmt. Kleinere Kationen kristallisieren in der trigonalen Calcitstruktur, bei der ein Ca-Ion von 6 Sauerstoffionen umgeben wird (kubisch dichte Kugelpackung mit 6-er Koordination). Größere Kationen führen hingegen zu der orthorhombischen Aragonitstruktur mit 9-facher Koordination. Auch bei höheren Drücken wandelt sich Calcit in den dichteren Aragonit um (zuletzt BRADY *et al.* 2004; LIN & HUANG 2004). Die unter Normalbedingungen metastabile Aragonitstruktur tritt in biogenen Hartteilen (Muschelschalen usw.) häufiger auf. Sr mit seinem größeren Ionenradius kann dabei leicht eingebaut werden. Seine Gehalte in jungen, aragonitischen Kalksedimenten zwischen 0,1 und 1 Gew% nehmen jedoch schon während der Diagenese bis auf meist unter 0,01 Gew% (40-700 ppm bei den hier untersuchten Proben) in den calcitischen Marmoren ab.

In Tabelle 1 sind die Ionenradien von Kationen bei 6-facher Koordination (RIEDEL 1990) angegeben, die Calcium im Calcit- und Dolomitgitter ersetzen können, und zusätzlich deren karbonatische Endglieder.

Kation	Sr^{2+}	Ca^{2+}	Mn^{2+}	Fe^{2+}	Mg^{2+}	Ce^{3+}
IR(nm)	11,3	10,0	8,2	7,8	7,2	10,1[6] 11,96 [9]
Karbonatendglied	Strontianit [9]	Aragonit [9] Calcit[6]	Rhodochrosit [6]	Siderit [6]	Magnesit [6]	z.B. Bastnäsit (Ce,La)(CO ₃)F

Tabelle 1: Ionenradien und Endglieder wichtiger karbonatbildender Kationen

⁸ Daneben entstehen bei sehr hohen Drücken und Temperaturen weitere Modifikationen, so der hexagonale Vaterit. Sie wandeln sich aber unter Normalbedingungen an der Erdoberfläche fast immer in die stabile Phase Calcit um, weshalb sie sehr selten anzutreffen sind.

Während das Sr-Endglied Strontianit in der Aragonitstruktur auftritt, kristallisieren Rhodochrosit (Mn), Siderit (Fe) und Magnesit (Mg) in der Calcitstruktur. Lediglich mit Rhodochrosit bildet Calcit eine unbegrenzte Mischkristallreihe, ansonsten bestehen ausgedehnte Mischungslücken. Calcit und die Karbonate allgemein können noch viele weitere Kationen in das Karbonatgitter einbauen. Unter ihnen werden die Seltenerdelemente in Kapitel 4.6.1 - 4.6.3 genauer diskutiert.

Im **Dolomit** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) wechseln sich Mg- und Ca-Lagen stöchiometrisch im Verhältnis 1:1 ab. Hierbei erfolgt gegenüber Calcit ein Symmetrieabbau von R3c zu R3 unter Zunahme der chemischen Stabilität, Härte und Verwitterungsresistenz.

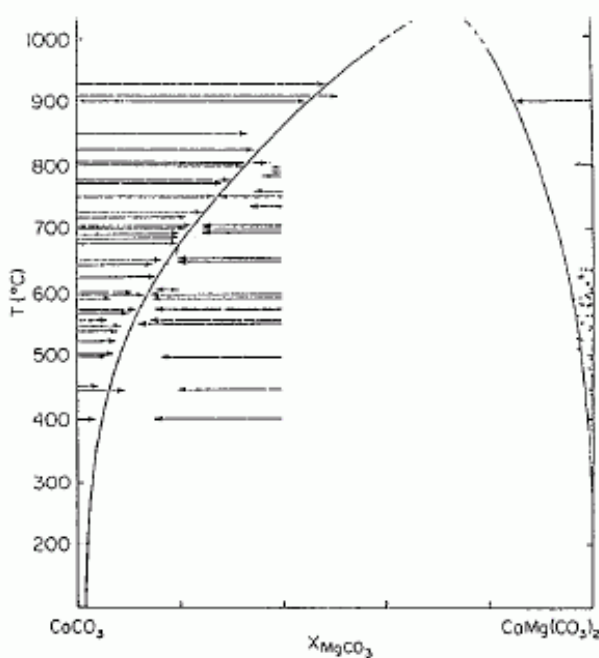


Abbildung 8: Calcit-Dolomit-Mischungslücke (aus ANOVITZ & ESSENE 1987)

Zwischen Calcit und Dolomit besteht eine im Wesentlichen temperaturabhängige Mischungslücke (Abbildung 8). Aus dem Mg-Anteil in Calcit, der im thermodynamischen Gleichgewicht mit Dolomit gebildet wurde, kann auf die Bildungstemperatur und damit auf den Metamorphosegrad geschlossen werden (Geothermometrie, s. auch Diskussion im Kapitel 4.5)⁹. Calcit besitzt eine sehr vollkommene Spaltbarkeit im Spaltrhomboeder nach [1011]; auf Druck rea-

giert er leicht mit der Bildung von Gleitzwillingen nach (0112).

Bei einer Lichtbrechung – je nach Lage der optischen Achsen – zwischen 1,486 und 1,658 gehört Calcit wie auch die anderen Karbonate zu den Mineralen mit der höchsten Doppelbrechung. Bei normalen Dünnschliffdicken weisen Karbonate deshalb immer hohe, bunte Interferenzfarben auf. Mittels Anfärbeverfahren wird versucht, die verschiedenen Phasen (Calcit, Dolomit, Ankerit etc.) auseinander zu halten. Der starke Chagrinwechsel lässt Schnitte in n_z dunkler erscheinen, was auch für das Erscheinungsbild mancher grobkörnigeren Marmore charakteristisch ist.

2.5.2 Verknüpfung von Mikro- und Makrostruktur

Erst durch die Metamorphose meist mariner Kalksteinsedimente nach Versenkung in mehrere Kilometer Tiefe und anschließender Wiederheraushebung nimmt der Calcit die Gestalt an, die die Eigenschaften von Marmoren bestimmt (vgl. Abbildung 367). Sie sind der eigentliche Inhalt dieser Arbeit und werden deshalb in diesem Kapitel nur grob skizziert. Wie diese Eigenschaften und die Verwendung von Marmoren zusammenhängen, wurde in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Die meisten Marmorlagerstätten sind regionalmetamorph entstanden. Untergeordnet tritt im Einflussbereich heißer magmatischer Körper aber auch Kontaktmetamorphose (BUICK & CARTWRIGHT 2000) auf, wobei Überschneidungen vorkommen und eine sichere Unterscheidung am antiken Objekt kaum möglich ist. Gleichfalls schwierig gestalten kann sich die Unterscheidung von metasedimentären Marmoren und magmatisch entstandenen Karbonatiten. Zwar sind letztere im Mittelmeerraum ohne Relevanz, können aber z.B. für die Herkunftsbestimmung antiker Marmorobjekte in Indien von Bedeutung sein. Während Anorthit, Fassait, Skapolith oder Spinell auf ein Kalksteinedukt hinweisen, tritt Pyrochlor nur in Karbonatiten auf (LE BAS *et al.* 2002); ihre Sr- sowie SEE-Gehalte (vgl. Kapitel 4.6) sind um Größenordnungen höher als in den aus Kalksteinen entstandenen Marmoren, und ihre stark verarmten Kohlenstoffisotopiewerte (s. Kapitel 3.4 und 4.7) entsprechen denen im Erdmantel (YANG *et al.* 2003).

⁹ (HARKER & TUTTLE 1955; GOLDSMITH & NEWTON 1969; ANOVITZ & ESSENE 1987; GOTTSCHALK & METZ 1992).

2.5.3 Kalksteine

Marmore entstehen aus sedimentären Kalksteinen. Der Entstehungsprozess der Hauptmenge

von Kalksedimenten ist biogener Natur und lässt sich auch heute beobachten.



Abbildung 9: Rezente Bildung mariner Kalke im Great Barrier Reef (Foto Germann)

Besonders in tropischen marinen Milieus finden vielfältige Lebensformen, die für die Ausbildung ihrer Hartteile Calciumkarbonat einbauen, ein ideales Umfeld für massenhaftes Auftreten. Riffbildner (Abbildung 9), die Schalen abgestorbener Muscheln, Foraminiferen, Brachiopoden usw. bedeckten in beträchtlicher Mächtigkeit ausgedehnte Areale des Meeresbodens im Schelfbereich. Eine große Rolle spielen auch Stromatolithen, bei denen rezent das Wirken von Cyanobakterien beobachtet werden kann. Dabei fällt ein Teil des ionar gelösten Calciums als Calcit aus (DIETRICH & SKINNER 1984). Physikalisch-chemische Ausfällungen von Calciten an Land, wie etwa bei den Travertinen oder Kalktuffen, treten demgegenüber wesentlich seltener auf und werden oft ebenfalls durch das Wirken von Mikroorganismen beeinflusst. Aufgrund des biogenen Ursprungs der meisten Kalksteine treten sie erst vom Kambrium an massenhaft auf, und insbesondere bei Marmoren ist eine Häufung des Entstehungszeitraums seit dem Mesozoikum feststellbar. Aber es wurden auch z.B. auf dem indischen Subkontinent über 3 Milliarden Jahre alte Marmore marinen Ursprungs aufgefunden (ZACHARIAH 1998). Karbonatgesteine leisten mit Abstand den größten Beitrag zur Fixierung von gasförmigem CO₂ und spielen damit eine enorme Rolle in der Regulierung des globalen Kohlenstoffzyklus und der atmosphärischen Zusammensetzung. Ungefähr 20% aller phanerozoischen Sedimentge-

steine bestehen aus ihnen (MORSE & ARVIDSON 2002).



Abbildung 10: Während der Alpenen Orogenese herausgehobene marine Riffkalksteine in den Dolomiten (Foto Germann)

Nach Überdeckung der häufig mehrfach umgelagerten Kalksteinsedimente treten schon während der Diagenese beträchtliche Veränderungen auf, an erster Stelle eine Lithifizierung verbunden mit einer Verringerung des Porenvolumens. Solche Kalksteinhorizonte können anschließend herausgehoben werden und bilden z.B. in Süddeutschland mächtige Gesteinsschichten, deren Fossilinhalt noch weitgehend erhalten ist. Auch große Teile der Nord- und Südalpen (wie die Dolomiten in Abbildung 10) und des gesamten mediterranen Areals bestehen aus solchen diagenetisch veränderten oder nur schwach metamorphen Kalken.

2.5.4 Metamorphe Marmorbildung

Bei Versenkung in größere Tiefen der Erdkruste erhöhen sich Druck und Temperatur dermaßen, dass es zu weit über die Diagenese hinausgehenden Veränderungen von Mineralbestand, Chemismus und Gefüge kommt. Allerdings gibt es graduelle Übergänge ohne scharfe Grenzziehung zwischen Kalkstein und Marmor, weshalb häufig von „Metakarbonatgesteinen“ gesprochen wird. Den reineren Kalkablagerungen fehlt es an Reaktionspartnern; hohe Abdichtung und geringes offenes Porenvolumen verhindern zudem ein Absinken des CO₂-Partialdrucks unter die Stabilitätsgrenze von Calcit und seine Reaktion mit Silikaten zu Wollastonit, Forsterit etc. (vgl. BALASHOV & YARDLEY 1998; BUCHER 1998).

Der über weite Druck-Temperaturbedingungen stabile Calcit weist infolgedessen während der Metamorphose vor allem eine Kornvergrößerung auf. Diese Korngrößenzunahme setzt partiell schon recht früh ein, hat aber erst in den eigentlichen Marmoren das gesamte Gefüge erfasst.

Je geringer der Anteil an Kristallisationskeimen war und je länger und ungestörter die Zeit für optimale Kornspaltung andauerte, desto größer und gleichkörniger können die Calcitkristalle ausfallen. Postmetamorpher Stress bringt wiederum Deformationserscheinungen (Zwillingslamellen, ungerade Korngrenzen etc.) bis hin zur Mylonitisierung mit sich. Feinkörnige Marmore gelten als besser geeignet für akkurate Skulpturarbeiten, aber auch die grobkörnigen Marmore von Naxos oder Thasos lieferten hervorragendes Material. Bedeutsamer dürfte die Verzahnung der Körner untereinander sein, also die Gesamtfestigkeit des Kornverbands (s. nächstes Kapitel).

Vom ursprünglichen Fossilbestand ist meist nichts übriggeblieben. Oft sind aber nicht-calcitische Relikte des Sedimentationsgeschehens erkennbar, und selbst die reinsten Marmore enthalten akzessorische Mineralien wie Quarz, Glimmer, Eisensulfide und -oxide oder organische Überreste der einstigen Meeresbewohner. Häufig migrierten Verunreinigungen an die Korngrenzen oder an die Randzonen des Marmorpaketes. Dies wurde von einer beträchtlichen Abnahme der Gehalte an in das Karbonatgitter schwer einbaubaren chemischen Elemente gegenüber den ursprünglichen Kalkstei-

nen begleitet. Umgekehrt begünstigt die Aufnahme von Magnesium schon während der Diagenese die Bildung von Dolomit.

Diese Homogenisierungsprozesse geben den Marmoren ihre verglichen mit den Kalksteindukten meist hellere Farbe. Beimengungen farbiger Übergangselemente – entweder im Karbonatgitter eingebaut oder als Komponenten akzessorischer Mineralphasen – verursachen weitere Farbnuancen: rot und gelb durch Eisenoxide, grün z.B. durch Chlorit und Serpentin, grau und schwarz durch Überreste organischer Substanzen, Graphit oder Pyrit. Aber auch Lichtbrechung in Körnern und an Korngrenzen kann einen gräulichen Farbton hervorrufen.

Wanderungsprozesse von Verunreinigungen und das quasi plastische Verhalten des Calcits bei hohen Drücken und Temperaturen unter tektonischer Belastung und Faltung bringen häufig die als Marmorisierung beschriebenen streifigen und welligen Muster mit sich. „Buntmarmore“ weisen einen sehr hohen Anteil akzessorischer Mineralien oder gar Komponenten anderer Zusammensetzung auf, oft als brekziöse bzw. konglomeratische Einschlüsse und Verbackungen.

Gelegentlich ist bei dolomitischen Marmoren das reliktsche Gefüge flachmariner Algentepiche etc. besser konserviert. Sie sind nicht nur ein ästhetisches Problem, sondern machen solche Marmore für die Herausarbeitung von bildhauerischen Details ungeeignet oder gänzlich unbrauchbar, wie z.B. häufig am Didymaion zu beobachten.

2.5.5 Festigkeit und Trennflächen

Im Vergleich zu härteren silikatischen Festgesteinen wie Granit, Basalt oder Gneis ist Marmor recht leicht bearbeitbar. Seine geringe Härte, leichte Polierbarkeit, homogene weiße Farbe und die als Transluzenz bezeichnete Lichtdurchlässigkeit bis in den dm-Bereich sind Eigenschaften, die ihn neben seiner relativen Häufigkeit und Verfügbarkeit als zentralen Werkstein der Antike prädestinierten.

Anders als z.B. bei Schiefen weisen ungestörte Marmore in allen drei Raumachsen ähnliche Festigkeitseigenschaften auf und splintern nur selten entlang einer bestimmten Vorzugsrichtung ab.

Ihre Druckfestigkeit ist wesentlich höher als bei Belastung auf Zug oder Torsion (Biegezugfestigkeiten um 15 N/mm^2).

Rohdichte	2,6 - 2,9 g/cm ³
Wasseraufnahme	0,2 - 0,6 Gew.-%
Druckfestigkeit	80 - 180 N/mm ²
Biegezugfestigkeit	6 - 15 N/mm ²
Schleifabnutzung	15 - 40 cm ³ /50 cm ²

Tabelle 2: Technische Kennwerte von Marmoren (DIN 52105 + <http://www.geodienst.de/marmor.htm>)

Deshalb sind Decken, Gebälke oder freistehende Gesimse statisch komplizierter und wurden häufig aus anderen Materialien wie z. B. Holz errichtet.

Aufgrund geringer Verfügbarkeit begehrter Marmore wurden die Torsi vieler Statuen aus minderwertigeren, billigeren – z.B. hymettischen – Marmoren gestaltet, die Köpfe hingegen beispielsweise aus kostbarerem hellweißem Lychnites von Paros, der auch für die Herausarbeitung von Gesichtszügen oder Haardetails bestens geeignet ist.

Zunächst nicht sichtbare Minerallagen aus Dolomit, Glimmer usw. haben in den antiken Steinbrüchen hohe Ausschussraten verursacht. Andererseits erleichterte die Ausnutzung des natürlichen Kluftsystems der Marmore den Abbau, welches zugleich die Obergrenze für die maximalen Blockgrößen setzt.

Zwar zeigen schon einfache Modellrechnungen (z.B. CELESTINO *et al.* 2001), dass feinkörnige Marmore eine höhere Druckfestigkeit besitzen als grobkörnige. Aber die Festigkeit des Kornverbandes wird von wesentlich mehr Faktoren beeinflusst, so dem Korngrenzenverlauf, unterschiedlichen Korngrößen und der Verzahnung der Kristalle insgesamt. Diese den Kompositmaterialien analoge Festigkeitszunahme wurde auch bei künstlich erzeugten Marmoren mit hohen – allerdings gleichmäßig verteilten – Quarzanteilen (>20 Gew%) beobachtet (DRESEN *et al.* 1998), während in natürlichen Marmoren solch hohe Quarzanteile segregiert vorkommen. Gelegentlich können Abplatzungen neben derartigen und anderen mineralischen Inhomogenitäten sowie Entspannungsrisen auch durch Gitterregelung des Calcits alleine verursacht werden. Demgegenüber dürfte die starke thermische Anisotropie des Calcits (u.a. SIEGSMUND *et al.* 2000), die heutigen Marmorbauwerken und Fassaden in Europa und den

USA im Zusammenspiel mit Frostzyklen stark zusetzt (s. Kapitel 2.5.8), im mediterranem Klima nur eine untergeordnete Auswirkung auf die Festigkeit des Marmorkornverbands gehabt haben. Generell bedingt die geringe Porosität von Marmoren (<0,2 Vol%) eine niedrige Wasseraufnahme und damit potentiell gute Frostbeständigkeit. Die an heutigen Marmorfassaden häufig auftretenden Ausbeulungen und Schäden dürften zu einem beträchtlichen Teil den sehr geringen Plattendicken geschuldet sein, so dass die Festigkeitsgrenze des Kornverbands durch innere und äußerlich induzierte Spannungen nach wenigen Jahren überschritten wird (s. ausführliche Diskussion der Festigkeitseigenschaften und Verwitterungsfaktoren in Kapitel 2.5.8).

2.5.6 Lagerstätten und Steinbrucharanlagen

Die die Karbonatsedimentation begleitenden sandigen und tonigen Ablagerungen wurden während der Metamorphose meist in Schiefer umgewandelt, die häufig die Randzonen einer Marmorlagerstätte bilden. Aus tonigen Sedimenten entstehen besonders unter tropischen Bedingungen bei Abfuhr der silikatischen Anteile Laterite (z.B. SCHWARZ & GERMANN 1994) und der Aluminiumrohstoff Bauxit (z.B. für die Türkei ARNI 1941; WIPPERN 1964), Prozesse, die in Karstlandschaften häufig auftreten (Meta-Karstbauxite).

Mit zunehmendem Metamorphosegrad bilden sich Diasporite bzw. Korundite (s. Abbildung 11). Unter Normaldruckbedingungen gibt Diaspor sein Wasser bereits bei 420°C ab und wandelt sich in dichteren Korund (von $3,5$ auf 4 g/cm^3) um. Der Übergang von der Grünschiefer- zur Amphibolitfazies wird u.a. durch Diaspor/Korund-Umwandlungsbedingungen von 10 kbar bei knapp 500°C markiert, wobei beträchtliche Fluidmengen in Umlauf gebracht werden können und das Korundgefüge während der Umwandlungsphase stark deformierbar ist (URAI & FEENSTRA 2001). Auch konnte experimentell bestätigt werden, dass entlang der Kontaktzone zwischen Bauxit- und Marmorhorizonten die Diaspor-Korund-Umwandlung besonders intensiv abläuft (LAPPARENT 1937; BARIC 1963; MPOSKOS 1978; THEYE & OCKENGA 1988; OCKENGA & OKRUSCH 1990; HAJI 1994; FOCKENBERG *et al.* 1996; HAFI 1996; WINKLER *et al.* 2001; FEENSTRA & WUNDER 2002; FEENSTRA *et al.* 2003). Dank ihrer nur noch von

Diamant übertroffenen hohen Härte (6,5 für Diaspor, 9 für Korund in der Mohs'schen Skala) konnten solche Smirgel ortsnah als abrasives Material zum Polieren von Gesteinsoberflächen eingesetzt werden und wurden deshalb z.B. auf Naxos bergmännisch abgebaut. Sie können nicht nur als Saphire oder Rubine Edelsteinqua-

lität erreichen (z.B. SCHMETZER & BARTELKE 1979). Die Smirgel (vgl. auch „Smirgelpapier“) verdanken ihren Namen der Stadt Smyrna, dem heutigen Izmir, in deren weiteren Umgebung sich ebenfalls beträchtliche Vorkommen befinden (vgl. YALÇIN 1987).



Abbildung 11: Diasporithalde in Marmorbruch bei Aphrodisias

Die Verfolgung derartiger Horizonte erleichtert das Auffinden hochwertiger Marmorlagerstätten (GERMANN 1981). Zugleich beschränken solche Begleitgesteine die Größe einer Lagerstätte selbst in ausgedehnten Lagerstättendistrikten beträchtlich.

Marmore zeigen ein ausgeprägtes orthogonales Kluftsystem, dessen Vorzugsrichtungen mehr oder minder senkrecht aufeinander stehen. Je stärker wechselnde tektonische Beanspruchungen und materialbedingte Inhomogenitäten auf die Lagerstättengeometrie einwirken, desto weniger können sie aufgefangen werden und machen sich als zusätzliche Störungen und Trennflächen bemerkbar. Wird der Marmorkörper von der auf ihm lastenden Bedeckung befreit, treten oft oberflächenparallele Entspannungsrisse auf, die manchmal den Abbau erleichtern, manchmal aber auch den Werkstein unbrauchbar machen. Sie sind einer der Gründe für die Rissbildung an Marmorobjekten erst nach ihrer Aufstellung.

Oft wird der Lagerstättenkörper durch Karsterscheinungen weiter zergliedert. Variierende CO₂-Gehalte im Regenwasser lösen den Kalk auf, der sich an anderer Stelle wieder ablagert. Die erweiterten Klüfte¹⁰ werden wieder aufge-

füllt, neben ausgefälltem Calcit enthalten sie oft Gesteinstrümmer sowie lateritische und bauxitische Verwitterungsprodukte. Noch dramatischer wirken sich großräumige Höhlensysteme und ganze Einsturztrichter (Dolinen etc.) aus.

Entscheidend für die Qualität einer Lagerstätte und die Verwendbarkeit des aus ihr extrahierten Werksteins ist demnach nicht nur die absolute Ausdehnung der Gesteinshorizonte oder -linsen, sondern auch die durch die Trennflächen- und Kluftsysteme bedingte maximale Blockgröße.

All dies war noch belanglos, als vor 5000 Jahren kleine Marmorfiguren, Behälter und Idole auf den Kykladeninseln aus Lesesteinen angefertigt wurden (WÄELKENS 1992). Der wachsende Bedarf an hinreichenden Marmor Mengen vergleichbarer Qualität und ausreichender Blockgrößen verlangte jedoch ein sich auf empirischer Ebene entwickelndes komplexes System von Exploration, Bergbau, Transport, Verwaltung und Verwendung.

Die Steinbrüche des Pentelikon weisen ein relativ engmaschiges Kluftsystem von 2-5 m Abstand auf. Schon deshalb mussten größere Säulen aus Einzelteilen zusammengesetzt werden. Auf der Insel Marmara hingegen kommen in manchen Lokalisationen Kluftabstände von über 10 m vor.

¹⁰ Die hohe Wasserdurchlässigkeit von Karstlandschaften mit schnellem Abtransport der Bodenkrume ist der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung äußerst abträglich. Häufig verlagern dort Flüsse ihren Lauf unterirdisch.

2.5.7 Gewinnung von Marmoren

Wie auch heute wurden Marmore fast ausschließlich über Tage im Bereich freistehender Marmorlinsen bzw. parallel zu den aus dem Gebirge ausbeißenden Marmorschichten gewonnen. Die abzutragenden Deckgebirgsschichten durften nicht zu mächtig sein. Größere Areale ließen sich bei subparallel zum Geländere relief verlaufenden Marmorschichten erschließen, vorausgesetzt, sie hatten keine zu intensive oberflächennahe Verwitterung oder gar Verkarstung erfahren.

Die manuelle Arbeit war mühsam, setzte aber große Erfahrung voraus und konnte keineswegs nur an Sklaven delegiert werden. RÖDER (1971) unterscheidet zwei in der Antike verwendete Steinbruch-Grundtypen: den in einen Hang eingeschnittenen Lehenbruch und die Steingrube. Beim Lehenbruch werden Abraum und Schutt hangabwärts und entlang der Anfahrtswege deponiert. Bei der Steingrube erfolgt die Ablagerung meist rings um die Grube. Zwischen diesen beiden Grundtypen sind Kombinationen möglich, und je nach Gelände kann es zu galerieartigen Aufreihungen der Lehenbrüche kommen. Oft lassen sich detailliert Hang-, Nischen- und Grubenbrüche mit terrassenförmigem Strossenbau rekonstruieren. Sowohl aus Gründen der Stabilität, der verfügbaren Abbautechnik und der Dimensionen des Lagerstättenkörpers sind Wandhöhen über 15 m eher selten; bei großen Gesteinsmächtigkeiten wurde zum Terrassenabbau übergegangen.

Zumeist unter Ausnutzung des natürlichen Kluftsystems (GERMANN 1981) wurden ca. 0,8 m breite Schrotgräben angelegt und bis zum Freistehen der Blöcke vertieft. Zahlreiche regelmäßige girlandenförmige Schrämspuren an Marmorwänden belegen den Einsatz von Hammer und Meisel, Zahneisen, Fäusteln und Picken (WÄELKENS *et al.* 1988). Gelegentlich genühten auch V-förmige Rillen, in die Holzkeile getrieben wurden bzw. die sich bei Wasserzugabe bis zum Absprengen der Sockel größerer Blöcke ausdehnten. Häufig erfolgte die Verarbeitung zu Halbfabrikaten im Steinbruch (ASGARI 1977; PESCHLOW-BINDOKAT 1981; WÄELKENS 1988), was sowohl Schäden an den Artefakten rechtzeitig erkennen ließ als auch dank Gewichtsreduzierung den Abtransport erleichterte. Sie können auch ein Indiz für serienmäßige Auftragsarbeiten sein.

Schrotgräben, Schrämspuren und vorgelagerte Halden mit kleinformatigen Abschlagstücken sind untrügliche Hinweise auf antike Steinbruchtätigkeit. Eventuell liegengebliebene Säulen, Kapitelle usw. erlauben sogar eine genauere Datierung zumindest ihrer korrespondierenden Abbauphasen.

Der Abtransport der Marmorblöcke zu den Bestimmungsorten oder zu Hafenanlagen erfolgte über Schlitten, Holzrollen und bei größeren Bruchrevieren auch auf eigens angelegten Transportwegen (WURCH-KOZELJ 1988). Hier finden sich gelegentlich Pfostenlöcher; Halteseile an dort eingelassenen Holzpflocken erleichterten ein kontrolliertes Abgleiten der oft tonnenschweren Ladungen.

In einigen Bruchgebieten, so in Euböa und auf Thasos, belegen Überreste militärischer Stützpunkte und Wachtürme die ökonomische Bedeutung der Steinbrüche (KOZELJ & WURCH-KOZELJ 1992, 1995).

In größeren Steinbruchgebieten waren oft Werkstätten und Schulen beheimatet, deren Spezialisten an vielen antiken Stätten wirkten.

Untertageabbau zur Schürfung auf Obsidian oder Erzen lässt sich bis in das Neolithikum und das alte Ägypten zurückverfolgen (WÄELKENS 1992). Er wurde seit hellenistischer Zeit nur sehr selten auch für die Gewinnung hochwertiger Marmore eingesetzt, so für den parischen Lychnites, bei Ephesos am Kuşini-Berg oder zu römischer Zeit in Carrara¹¹. Bei im Untertagebau geförderten Marmoren besteht allerdings auch eine höhere Gefährdung durch nachträgliche Entspannungsrisse.

¹¹ Obwohl auch heute noch der Marmorabbau überwiegend oberirdisch erfolgt, wird nicht zuletzt unter Umweltaspekten und der Gewinnung besserer Qualitäten auch an der TU Berlin an Möglichkeiten zur Optimierung des Untertageabbaus geforscht (s. KOCH-MOECK 2004).

2.5.8 Marmorverwitterung und Konservierung

Aus den oben beschriebenen allgemeinen Festigkeitseigenschaften von Marmoren ergibt sich auch die im Vergleich zu anderen Werksteinen hohe Verwitterungsanfälligkeit antiker Marmorobjekte im Museum und Gelände sowie bei der modernen Nutzung in Außen- und Innenarchitektur. Diese Problematik hat sich in den feuchteren Klimazonen mit ausgeprägteren Temperaturschwankungen besonders unter dem Einfluss säurehaltiger Niederschläge verstärkt.

Vor allem in Hinblick auf die hohen ökonomischen Einbußen wurde in den letzten Jahren verstärkt versucht, die genauen Wirkmechanismen bei der Marmorverwitterung herauszufinden.

Unterdessen liegen zahlreiche detaillierte Untersuchungen und Zusammenfassungen zu allgemeinen Eigenschaften, Auswahl, Schadensdiagnostik und Konservierung von Marmoren vor (z.B. WINKLER 1994; OLSON 1995; SIEGSMUND *et al.* 1999; HOIGARD 2000; LASKARIDIS & PAPAIOANNOU 2001; SIMON 2001; BACKERS *et al.* 2002; SPATHIS *et al.* 2003; CARFAGNI 2004; CHEN & LIN 2004; RAMSEY & CHESTER 2004; SALINAS-NOLASCO *et al.* 2004; SINGH *et al.* 2004; VERGARA *et al.* 2004; ZULAUF & ZULAUF 2004). Fallstudien zu Marmoren, Kalksteinen und Graniten finden sich u.a. bei PRIKRYL & VILES (2002). Von enormer Bedeutung ist allerdings die Klärung der Frage, inwieweit Labordaten auf die tatsächlichen Eigenschaften am antiken Objekt und Bauwerk übertragbar sind (z.B. POPE *et al.* 2002).

Ein Verständnis der Verwitterungsprozesse ist aber auch für die Provenienzanalyse notwendig, nicht zuletzt weil sie z.B. Einfluss auf die geochemische und isotopische Zusammensetzung (s. Kapitel 3.4.5) haben können (MARGONIS & SHOWERS 1988; MATTHEWS 1988).

Für die Verwitterungsprozesse lassen sich in Anlehnung an RIEDERER (1988) drei teilweise miteinander verknüpfte Hauptfaktorengruppen ausmachen:

Physikalische Faktoren:

- Anisotrope thermische und elastische Koeffizienten des Calcits führen bei Veränderungen der Temperatur und des Auflastdrucks zu ungleichen Volumenänderungen der einzelnen Mineralkörner mit

anschließender Auflockerung des Kornverbands.

- Mikrorisse infolge der Bearbeitung erhöhen das offene Porenvolumen und erleichtern das Eindringen von Feuchtigkeit und gelösten Salzen sowie die Sprengwirkung durch Frostzyklen.
- Belastungen durch falsche Statik bei der Aufstellung, die in windreichen Regionen verstärkt werden; nachträgliche Schädigungen durch Feuer und Erdbeben (MOUZAKIS *et al.* 2002; PAPANTONOPOULOS *et al.* 2002); Entspannungsrisse, natürliche Vorschädigungen, Schwächezonen durch Inhomogenitäten wie Einregelungen, Schichtungen und Minerallagen, Vorbelastungen durch Kerbschlagwirkungen bei der Formgebung durch die antiken Bildhauer, die vor allem an hervorstehenden Teilen ein Abplatzen erleichtern.

Chemische Faktoren im Zusammenspiel mit Feuchtigkeit:

- Umwandlung des Calcits in lösliches Kalziumbikarbonat, Bildung von Gips und anderen Salzen
- Verwendung sulfathaltiger Mörtel mit einem stark treibenden Effekt
- Zersetzung von Metallteilen wie Dübeln und Klammern einschließlich Verfärbungen

Biogene Faktoren:

- Lochfraß und Verfärbungen durch organische Säuren und sonstige Stoffwechselprodukte biologischer Aktivität von Flechten, Algen, Bakterien und sonstiger epi- und endolithischer Mikroorganismen.

In der "Patina", einer Verwitterungskruste als dünner Grenzschicht zwischen Marmor und Umwelt, schlagen sich all diese Faktoren je nach Ausgangssubstrat und Umgebungsbedingungen konzentriert nieder. Sie besteht – neben dem mechanisch veränderten Calcit – zumeist in Verbindung mit Aerosolen und Staub aus Eisen- und Manganoxiden, Tonmineralen und anderen Silikaten, Gips, Ca-Oxalaten sowie mannigfaltigen organischen Substanzen (MOROPOULOU *et al.* 1998; GRAEDEL 2000; MOROPOULOU *et al.* 2001; GARCIA *et al.* 2002; MOROPOULOU *et al.* 2002; POLIKRETI & MANIATIS 2003a). Detailliert wur-

den u.a. Patinas pentelischer Marmore wie am Athener Parthenon untersucht (MARAVELAKI 2001; GALANOS & DOGANIS 2003; POLIKRETI & MANIATIS 2003b).

Versuche in SO₂-haltigen Korrosionskammern zeigten nach einer Woche die Bildung von Gipsausblühungen auf der Oberfläche (MALAGA-STARZEC *et al.* 2003). Der Korrosionsangriff ging von den Tripelpunkten und Korngrenzen aus, bei dolomitischen Marmoren erwiesen sich Risse und Poren als gefährdetste Bereiche (vgl. auch BRAGATO *et al.* 2002; BERNAL & BELLO 2003).

Eine wichtige Rolle nehmen der Porenraum und die Wechselwirkung mit Fluiden ein (NEIL 1989; POSCHLOD 1990; SCHIERMUND RONALD 1991; DOEHNE 1994). Die lösungsbedingte Ausdehnung des Porenvolumens kann sowohl durch Vergrößerung einzelner Poren als auch durch die Fusion von Mikroporen erfolgen (ORKOULA & KOUTSOUKOS 2001).

Historische Verwitterungsraten der letzten 110 Jahre wurden an über 1000 Grabsteinen gemessen und kritisch diskutiert (ROBERTS 2002). Dabei zeigten sich in semiariden Gebieten kaum messbare Veränderungen, in feucht-humiden Klimazonen hingegen Abtragungen bis 5 mm Tiefe (zu anderen Grabsteinen in Ohio s. BAUER *et al.* 2002). Als Inkubationszeit der Einwirkung von Feuchtigkeit auf Carrara-Grabsteine in Großbritannien wurden 20-30 Jahre ermittelt, die eigentliche Verwitterung weist jährliche Raten von 5-50 µm auf (HOKE & TURCOTTE 2004), für schottische Grabsteine um 8 µm/Jahr (MCNEILL 1999). Diese Raten liegen höher als die für das Entstehen von Vertiefungen in am Colorado River abgelagerten holozänen Kalksteinblöcken angegeben 2,4 mm/1000 Jahre (HEREFORD *et al.* 1998). Demgegenüber wurden an Kalksteinen des Großen Tempels von Amman je nach Feuchtigkeitsexposition Abtragungsraten von 0-15 mm/1000 Jahre bestimmt (PARADISE 1998).

Der Einfluss der thermischen Anisotropie wurde u.a. von SIEGISMUND *et al.* (2000) und LOGAN (2004) hervorgehoben und auch neutroendifraktometrisch untersucht (NIKITIN *et al.* 2004). Die letztgenannte Methode erlaubt auch ein tieferes Verständnis des Zusammenhangs zwischen Makro- und Mikrostress (SCHEFFZUEK *et al.* 2004).

Die quantitative Erfassung der die Festigkeit fundamental beeinflussenden Calcitanisotropie

mittels Ultraschall- (DUERRAST *et al.* 1999) und U-Tisch-Messungen zeigte gute Übereinstimmungen; dabei erwiesen sich Ultraschallmessungen (US) auch für die Abschätzung der Wirkung von Konservierungsmitteln als geeignet (SHEREMETI-KABASHI 2002). Für Letzteres wird unterdessen auch die Eignung von Verfahren wie der NMR-Spektroskopie (ALESIANI *et al.* 2002; ALESIANI *et al.* 2003) oder der Infrarot-Thermographie (AVDELIDIS & MOROPOULOU 2004) studiert. Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung der Anisotropie und Gesteinsauflockerung ist der kombinierte Einsatz von Refraktionsseismik und seismischer Transmissionstomographie (CARDARELLI & DE NARDIS 2001). Eine Untersuchung von Marmorbauwerken in Tirol mittels MGS-, Isotopen- und Mn-Analysen zeigte hingegen, dass hier verschiedene Marmore (möglicherweise aus Laas und Sterzing) benutzt wurden, obwohl die unterschiedlichen US-Geschwindigkeiten zunächst Verwitterungseffekte nahegelegt hatten (RECHEIS *et al.* 2002).

CHABAS & JEANNETTE (2001) studierten den gravierenden Einfluss von über Wind oder Grundwasser eingetragenen Salzen (s.a. DEI *et al.* 1999) in Küstennähe an Marmoren und Graniten auf Delos.

Besonders fatal ist die realiter auftretende kombinierte Wirkung verwitterungsinduzierender Faktoren, wie die Calcitanisotropie nicht berücksichtigende Plattendimensionen und Schnittlagen, Temperaturzyklen sowie Feuchtigkeit (CATTANEO & LABUZ 2001; KOCH & SIEGISMUND 2004). Hinzukommt besonders in urbanen Räumen ein schwer quantifizierbares, aber umso gravierenderes kombiniertes Einwirken oxidierender gasförmiger Phasen wie – neben dem schon erwähnten SO_x – NO_x und Ozon (MASSEY 1999).

Zahlreiche Untersuchungen widmen sich dem Einfluss von Wurzeln (MOTTERSHEAD *et al.* 2003) und anderer biogener Faktoren (Mikroben, Pilze, Algen, Flechten, Moosen) auf die Marmorverwitterung und mögliche Konservierungsmittel (LEWIN & CHAROLA 1981; DANIN 1993; BRUNI *et al.* 1995; STERFLINGER 1995; DIAKUMAKU 1996; ALTIERI & RICCI 1997; BOGOMOLOVA *et al.* 1997; BOLIVAR & SANCHEZ-CASTILLO 1997; RANALLI *et al.* 1997; EVSTRAPOV *et al.* 1998; MANSCH & BECK 1998; BOGOMOLOVA 1999; DE LEO *et al.* 1999;

STERFLINGER *et al.* 1999; BOGOMOLOVA *et al.* 2000; LAMENTI *et al.* 2000; BOULVAIN *et al.* 2001; GARCIA *et al.* 2002; ROIG-SALOM *et al.* 2003; SBARAGLIA *et al.* 2003; VLASOV & ZELENSKAYA 2003; SAARELA *et al.* 2004). Hierbei wurde immer wieder der relativ hohe Beitrag der Oxalsäuren festgestellt (zuletzt MONTE 2003). Für die hohe Überlebensfähigkeit der Mikroorganismen auch unter ungünstigsten Bedingungen gibt es zahlreiche Belege (GORBUSHINA 2003), die in der Tat kaum eine Gesteinsoberfläche unbesiedelt lassen. Schon nach einem Jahr traten auf frisch restaurierten Marmoroberflächen in Florenz photosynthetisierende Mikroorganismen deutlich zu Tage (LAMENTI *et al.* 2000). Mikroorganismen verwerten Fettsäuren und andere Bestandteile urbaner Stäube und umweltbelastender Aerosole; der Einbau von Blei kann z.B. die Rotfleckung mikrobiotischer Kolonien hervorrufen (ZANARDINI *et al.* 1997; ZANARDINI *et al.* 2000). POHL (2000) zeigte, dass in hochgelegenen alpidischen Terrains das Karbonatsubstrat besiedelnde endolithische Biofilme eine eher symbiotische Beziehung mit ihrem Wirt eingehen und protektive Wirkungen auf seine Oberflächen haben können, u.a., da sie ihre lebensnotwendigen Spurenelemente aus atmosphärischen Einträgen (Aerosole, Staub) beziehen. Eine ähnliche Ansicht vertrat FRANZINI (1995) bezüglich Ca-Oxalatschichten (kryptokristalliner Whewellit oder Weddelit), die auf die Imprägnierung der Oberflächen mit Eiweißanstrichen zurückgingen, gegen die weitere Verwitterung Schutz böten und deren Entfernung deshalb kontroproduktiv sei.

Solche Aspekte sollten auch beim Einsatz aggressiver konservatorischer Mittel berücksichtigt werden, wie der Entfernung von Oberflächenbelägen durch Sandstrahl-, Säure- oder Laserreinigung (ASMUS 1978; VERGES-BELMIN *et al.* 1995; MARAVELAKI-KALAITZAKI *et al.* 1999; LEE & WATKINS 2000; TORNARI *et al.* 2000; LEE *et al.* 2001; MARAVELAKI 2001; SA-

LIMBENI *et al.* 2001; MOSSOTTI 2002; GOMEZ-HERAS *et al.* 2003; LAZIC *et al.* 2004). Bei der Laserreinigung wiesen insbesondere feinkörnigere Marmore größere Schädigungen auf (RODRIGUEZ-NAVARRO *et al.* 2004), und es kann beispielsweise zu Gelbverfärbungen kommen (KLEIN *et al.* 2001).

Ein Beispiel für demgegenüber schonende Restaurierungsarbeiten (vgl. auch HERES 1996) wird am Pergamonaltar in Kapitel 4.2.1 vorgestellt.

Trotz zahlreicher Verbesserungen haben sich alle Versuche von Oberflächenversiegelungen (NUGARI & PIETRINI 1997; POULIOS *et al.* 1999; ALESSANDRINI *et al.* 2000; BENEDETTI *et al.* 2000; BALLERINI *et al.* 2001; CHIANTORE *et al.* 2001; TONIOLO *et al.* 2001; BOKE *et al.* 2002; HENON *et al.* 2002; BOKE & GAURI 2003) bei freistehenden, der Verwitterung ausgesetzten Marmoren bisher als langfristig wirkungslos erwiesen, wenn nicht gar als schädlich. Gerade in Gegenden mit hoher Luftfeuchtigkeit und -verunreinigung, starken Temperaturschwankungen und Tau-Frostzyklen (ONDRASINA *et al.* 2002) empfiehlt sich die Ersetzung der Originale durch Kopien und deren Einlagerung in geschützten Räumen (allerdings bieten selbst Museen keinen absoluten Schutz, vgl. KATSANOS *et al.* 1999) bei konstanten Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen (zur Wirkung von Tau z.B. CAMUFFO & GIORIO 2003). Selbstverständlich sollte die Verringerung der umweltschädlichen Einträge an erster Stelle stehen. Eine Verlangsamung – aber keineswegs ein vollständiger Stillstand – der zerstörerischen Einwirkungen lässt sich durch provisorische Maßnahmen wie dem Schutz vor direktem Regenfall erreichen. So verlief in stark belasteten ostasiatischen Arealen der Erosionsfortschritt bei direkter Regenexposition 2-6 mal schneller als schon bei einfacher Überdachung der Marmorobjekte (KIM *et al.* 2004).

3 Herkunftstypische Merkmalsmuster von Marmoren und Methoden zu ihrer Bestimmung

Obwohl auch wesentlich ältere vergleichende Beschreibungen bekannt sind (z.B. LESSER 1752), markieren erst die petrographischen Charakterisierungen von LEPSIUS (1891) den Beginn der geowissenschaftlichen Bemühungen, herkunftstypische Merkmalsmuster an Marmoren festzustellen.

Unterdessen ist die Fülle an Literatur zur archäometrischen Marmorforschung kaum mehr überblickbar. Dies steht gleichermaßen in Zusammenhang mit der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes wie der Notwendigkeit interdisziplinärer Zusammenarbeit unterschiedlichster Richtungen aus Natur- und Kulturwissenschaften.

Diese notwendigerweise internationale Kooperation manifestiert sich auch in zahlreichen Konferenzen und deren Publikationen. An erster Stelle genannt werden muss die *Asociacion for the Study of Marble and Other Stones Used in Antiquity* (ASMOSIA), die seit 1988 sieben internationale Konferenzen veranstaltet hat, auf denen Archäologen, Architekten, Geologen, Geochemiker, Mineralogen und Kunsthistoriker Erfahrungen austauschen und dazu beitragen, den in vielen Arbeitsgruppen gewonnenen Kenntnisstand zu verallgemeinern. Es wäre sehr viel gewonnen, wenn in der Zukunft die Flut an Messwerten, Bestimmungsmethoden und sonstigen Erkenntnissen zu Lagerstätten und antiken Objekten in einer Datenbank vergleichbar gemacht und z.B. über das Internet der Forschergemeinde zur Verfügung gestellt würde.

Grundsätzlich kann jede analytische Technik auf ihre Eignung getestet werden, herkunftstypische Merkmalsmuster zu detektieren, die in irgendeiner Weise materialinhärent und/oder Folge seiner Interaktion mit der Umwelt sind. Neue Verfahren, die Verbesserung der Nachweisgrenzen traditioneller Analytik sowie ihre Kombination mit computergestützten Auswertungsverfahren lassen noch zahlreiche weitere Anwendungen erwarten, jedoch ohne Erfolgsgarantie. Beispielsweise hat sich die Thermolumineszenz (TL) trotz ihrer prinzipiellen Eignung zur Datierung archäologischer Objekte bisher als zu sensibel gegenüber Variationen in der solaren Einstrahldauer und -intensität erwiesen (LIRITZIS & GALLOWAY 1999; BAIETTO *et al.* 2000; LIRITZIS 2001; POLIKRETI *et al.* 2003).

Im folgenden wird sich deshalb auf einen Überblick geowissenschaftlich relevanter Untersuchungsmethoden und ihrer Voraussetzungen zur Herkunftsbestimmung von Marmor beschränkt und darauf verwiesen, welche Verfahren und Techniken in dieser Arbeit Verwendung fanden.

3.1 Abhängigkeit der Untersuchungsmethoden von der Möglichkeit der Probenahme im Museum und Gelände

Die Entnahme von Proben an **antiken Objekten** steht im Spannungsfeld zwischen konservatorischen Gesichtspunkten, die nach traditioneller Einstellung einer Probennahme grundsätzlich entgegenstehen, und dem Bedarf an optimalen Probenmengen besonders für die petrographische Charakterisierung (Dünnschliffe, Anschliffe und Dickschliffe für die Kathodolumineszenz-Analyse), die mineralogische (Pulverdiffraktometrie) und chemische Analyse sowie die Quantifizierung des säureunlöslichen Anteils (Tabelle 3).

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">➤ Minimal-invasiver/destruktiver Charakter der Beprobung von Artefakten➤ Hohe Herkunftsselektivität des Merkmals bzw. von Merkmalskombinationen➤ Geringe Probenmenge➤ Genaue und reproduzierbare Bestimmung des Merkmals➤ Systematische Erfassung „äußerer“ Merkmale |
|--|

Tabelle 3: Allgemeine Voraussetzungen für die Feststellung von Merkmalen zur Herkunftsbestimmung von antiken Marmoren (GERMANN & CRAMER *in press*)

Aber auch die erwünschte Repräsentativität für das gesamte Marmorobjekt (insbesondere Abschätzung von Inhomogenitäten und Ausschluss von Nuggeteffekten), notwendige Wiederholungsmessungen sowie Vergleichbarkeit der naturwissenschaftlichen Messergebnisse setzen eine ausreichende Zahl hinreichend großer Proben voraus. Dank der Restaurierungsarbeiten an der Mehrzahl der hier zu untersuchenden Marmorobjekte konnte die Probennahme in Hinblick auf die Aussagemöglichkeiten der naturwissenschaftlichen Analytik zumeist optimal gestaltet werden; oft standen Bohrkerne zur Verfügung.

Der Probenahme im **Gelände** waren demgegenüber nur durch den knappen zeitlichen Rahmen und die Transportkapazitäten Grenzen gesetzt. Zusammen mit Material, das im Laufe früherer von Klaus Germann geleiteter Projekte aus der *Bafa-See-Region, den Kykladeninseln (v.a. Naxos und Paros), Thessalien und Carrara* entnommen wurde, sowie von Anneliese Peschlow-Bindokat und Heinz Knoll eingebrachten Proben (*Phourni-Inseln, Thasos-Aliki, Penteli und Hymettos*) wurden 262 Lagerstättenproben geowissenschaftlich untersucht. Bei der Mehrzahl der Anwender von naturwissenschaftlichen Herkunftsbestimmungsmethoden besteht Einigkeit darüber, dass Einzel-

merkmale nur eine relativ geringe Aussage-sicherheit zulassen. Deshalb werden zunehmend **Merkmalskombinationen** eingesetzt, wobei sich die Methodenauswahl allerdings häufig zwangsläufig eher an der Verfügbarkeit bzw. Zugänglichkeit der einzelnen analytischen Verfahren orientiert.

Eine geowissenschaftlich sinnvolle Merkmalskombination sollte einen umfangreichen Katalog einfach erfassbarer lithologischer Merkmale, Kennzahlen für die Korngrößenverteilung sowie spurenelement- und isotopengeochemische Variablen umfassen (Tabelle 4, Tabelle 5).

Merkmale / Eigenschaften	Probenart	Probenbedarf	Selektivität (1-5)	Bemerkungen (grau unterlegt: hier eingesetzt)
Lithologisch / petrographische Merkmale (makroskop., qualitativ), s. Tabelle 6				
Farbe	-	-	2	evtl. Reinigung oder frischer Bruch
Muster: Ohne Muster; mit Bänderung, Streifung, Äderung; unregelmäßige Muster	-	-	3	evtl. Reinigung oder frischer Bruch
Korngrößen (MGS)	-	-	3-4	Handlupe, saubere Flächen
Kornorientierung	-	-	3	Handlupe, saubere Flächen
Lichtdurchlässigkeit	-	-	2-3	fokussierbare Taschenlampe oder Laser
Geruch	Chip	bis einige g	4	mech. Zerstörung mindestens einiger Kristalle
Patina	-	-	3	hohe Fe-Gehalte im Karbonatgitter, z.B. Penteli
Gesteinsphysikalische Parameter:				
Druck-, Biegezugfestigkeit	Würfel, Prisma	50*50*50 mm	?	kaum archäometrische. Aussagekraft
Porosität	Würfel	> 125 g	?	
Wasseraufnahme	Würfel	> 125 g	?	
Lichtdurchlässigkeit	Scheiben			manchmal hoch (Paros Lychnites)
Mineralogisch-petrographische Eigenschaften: (DS = Dünnschliff)				
Korngrößenverteilung (quant. MGS, AGS)	Chip /DS	2-10 cm ²	4	evtl. Bildverarbeitung, Gesamtaufnahmen DS
Kornorientierung (qualitativ und quantitativ)	Chip /DS	2-10 cm ²	3	evtl. Röntgentextur-Analyse
Kornform, -grenzen	Chip /DS	2-10 cm ²	2-3	
Mineralbestand:	Chip /DS/ Pulver	2-10 cm ²	3	
Hauptkomponenten(Calcit, Dolomit)	DS/Pulver XRD	XRD: 1-2 g	2-4	Calcit-Dolomit-Verhältnis
Akzessorien (Quarz, Glimmer, Graphit etc.)	DS/Auflicht	2-10 cm ²	2-4	nur im DS quantifizierbar
Kathodolumineszenz	Chip/ polierter Dickschliff	2-10 cm ²	3	aufwändig
Paramagnetische Zentren (Mn etc.) EPR	Chip/ Pulver	30-100 mg	2 – 4	aufwändig, präparationsbedingte Peaks
Chemische Eigenschaften:				
Geochemische Charakteristik des Gesamtgesteins (INAA, RFA)	Chips, Pulver	1 g	2	wenig Aussagewert wg. "Nugget"-Effekten, für RFA meist zu "sauber"
Spurenelemente in den Karbonatphasen (AAS, ICP-AES, ICP-MS, ICP-OES)	Chips, Pulver	< 1 g	3-4	Elemente im säurelöslichen Anteil des Marmors
Menge des säureunlöslichen Rückstands	Chips, Pulver	1 g	3	Abschätzung aus DS
O- und C-Isotopie (Massenspektrometrie)	Chips, Pulver	100 mg	3-4	Oberflächen- bzw. Verwitterungseffekte
Sr-Isotopie (Massenspektrometrie)	Chips, Pulver	100 mg	1-2	wenig Vergleichsdaten

Tabelle 4: Potenziell einsetzbare Merkmale für die Herkunftsbestimmung, erforderliche Probenart und -mengen sowie Selektivität (1 sehr geringe, 5 sehr hohe Aussagekraft)

Lithologische Merkmale: Farbe, Muster etc.
mittlere Korngröße (AGS), maximale Korngröße (MGS), Korngrößenverteilung
säureunlöslicher Rückstand (AIR: Acid Insoluble Residue)
Spurenelemente in der Karbonatphase: Fe, Mg, Mn, SEE, Sr, Zn (CS-TEA: Carbonate Soluble Trace Element Analysis)
Sauerstoff-Kohlenstoff-Isotopie (C-O-SIA: C-O-Stable Isotopic Analysis)

Tabelle 5: Geowissenschaftlich begründete Merkmalskombination für die Marmor-Herkunftsbestimmung

3.2 Petrographisch-mineralogische Merkmale

Um eine Herkunftsbestimmung von Marmoren leisten zu können, sollte keinesfalls auf die "klassischen" petrographischen Untersuchungsmethoden zugunsten "moderner" Methoden verzichtet werden. Erstere sind oft zeitaufwändig, mühsam, erfordern einige Erfahrung und sind für sich alleine nur selten eindeutig. Sie erlauben jedoch, eine Reihe unerlässlicher Informationen über den Werkstein zu erhalten und so Fehlbestimmungen vorzubeugen. Je nach Fragestellung, Marmortyp und zur Verfügung stehendem Vergleichsmaterial können unterschiedliche petrographische Merkmale in den Vordergrund des Interesses treten.

Bei den Pergamonaltarmarmoren z.B. erwiesen sich neben der weißen Farbe mit gelegentlichem Graustich und paralleler dunkler Bänderung die Korngröße und -form, Deformationserscheinungen sowie der akzessorische Mineralbestand und

der Geruch als besonders aussagekräftige petrographische Merkmale.

3.2.1 Äußere Merkmale - Makroskopische Untersuchungen

Die Erfassung von mit bloßem Auge oder Lupe feststellbaren Merkmalen ist unverzichtbare Voraussetzung jeder Gesteinscharakterisierung und Herkunftsbestimmung. Sie erlaubt eine erste Klassifizierung und u. U. bereits eine Zuordnung zu bekannten Steinbrüchen, insbesondere wenn sie mit Erkenntnissen der Feldarbeit verknüpft wird.

Die hier beschriebenen äußeren Merkmale können auch von Nichtgeowissenschaftlern nach kurzer Einarbeitung erfasst werden. Tabelle 6 gibt einen Überblick über solche leicht erkennbaren Merkmale. Kursiv ist als Beispiel prokonesischer Marmor (von der Insel Marmara) eingetragen.

Kristallgröße	<ul style="list-style-type: none"> ➤ feinkristallin (max. 2 mm) ➤ <i>mittelkristallin (2-5 mm)</i> ➤ grobkristallin (5-10 mm) ➤ sehr grobkristallin (> 10 mm)
Kristallgrößenverteilung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ gleichkörnig ➤ <i>ungleichkörnig</i> ➤ <i>sehr ungleichkörnig</i>
Farbe	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>überwiegend weiß</i> ➤ weiß-grau gemustert ➤ überwiegend grau ➤ andere Farben
Muster	<ul style="list-style-type: none"> ➤ kein Muster ➤ Bänderung/Streifung: <i>grobgebändert</i>, feingebändert, geflasert ➤ Aderung: netzartig, breccienartig ➤ Unregelmäßige Muster: Geflammt, gesprenkelt, wolkig
Geruch (bei mechanischer Zerstörung des Kornverbands)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ohne ➤ schwach („bituminös“) ➤ <i>stark (nach „faulen Eiern“- H₂S)</i>
Kristallorientierung: keine, Lichtdurchlässigkeit: mittel, Patina: keine, Akzessorische Minerale: Dolomit, Quarz, Glimmer, Opak (Pyrit, Graphit)	

Tabelle 6: Äußere Merkmale von Marmoren (kursiv: das Beispiel Marmara)

Grundsätzlich sollte die Feststellung äußerer Merkmale an frischen Bruchflächen oder zumindest gesäuberten Oberflächen erfolgen. Auch ist es sinnvoll, die Eigenschaften sowohl an der

trockenen als auch mit Wasser benetzten Oberfläche zu überprüfen. Eine starke Lichtquelle kann gute Dienste leisten. Insbesondere folgende Merkmale lassen sich unterscheiden:

- a) **Kristallkorngrößen** werden am besten mittels einer Messlupe mit eingebauter Millimeterskala bestimmt. Sinnvoll ist die Aufnahme sowohl der maximalen Korngrößen (MGS) als auch kleinerer Körner, insbesondere wenn eine
- b) **ungleichkörnige Größenverteilung** der Kristalle erkennbar ist. Bei vielen Marmoren (Carrara, Penteli, Thasos, Ephesos, Herakleia) erscheinen die Kristallkörner von ungefähr gleicher Größe, bei anderen Marmoren (Marmara) sind deutliche Größenunterschiede im Gefüge erkennbar.
- c) **Farbe und Farbverteilung**: hierbei ist zu beachten, dass ungünstige Lichtverhältnisse, Beläge und Verwitterungserscheinungen zu unterschiedlichen Farbeindrücken führen können. Mittels normierter Farbtafeln wie der Munsell Rock-Color Chart kann versucht werden, die Farbwerte zu objektivieren.
- d) **Inhomogenitäten** im Mineralbestand und der chemischen Zusammensetzung können sich in verschiedenen **Mustern** niederschlagen: Bänderungen, **Streifungen**, Äderungen usw. Beachtung verdienen auch Schieferungen, Klüftungen einschließlich sekundärer Einlagerungen, Risse, Abplatzungen, Bruchflächen und -richtungen sowie deren Winkel zur bearbeiteten Oberfläche.
- e) Manche Marmore strömen bei mechanischer Zerstörung einen eigentümlichen **Geruch** nach Bitumen oder H_2S („faulen Eiern“) aus, ein Phänomen, das schon von LEPSIUS (1891) für einige Vorkommen als herkunftstypisch beschrieben wurde. Oft genügt schon das Ankratzen mit einer Stahlnadel, wobei beachtet werden muss, dass der Geruch sich sehr schnell verflüchtigt.
- f) Manchmal zeigen die Kristalle im Marmor eine **Längung** und Orientierung in eine bestimmte Richtung. Dabei ist zu beachten, dass sie nur an Oberflächen beobachtet werden kann, die einigermaßen parallel zu diesen verlaufen.
- g) Werden Marmore z.B. an Kanten mit einer stark fokussierten Lichtquelle durchstrahlt, lassen sie je nach Material den Lichtstrahl in unterschiedlich starkem Maß mehrere Zentimeter bis Dezimeter hindurchtreten. Diese **Transluzenz** ist z.B. bei parischen Lychnites besonders ausgeprägt.
- h) Manche freistehenden Marmore zeigen an der Oberfläche eine gelbliche **Patina**, die durch die Freisetzung und Oxidation von Eisen entsteht. Sie ist z.B. für pentelische Marmore typisch, in deren Karbonatgitter relativ hohe Eisengehalte eingebaut sind. Eine solch homogene Patina unterscheidet sich von durch Anreicherungen an Fe-Mineralien hervorgerufenen Flecken und darf auch nicht mit Schmutzablagerungen oder Versinterungen der Oberfläche infolge der Ablagerung in wässrigem Milieu verwechselt werden, auch wenn die Unterscheidung nicht immer leicht fällt.
- i) **Mineralgehalt**: Insbesondere weißer Marmor besteht meist fast vollständig aus **Calcit**, teilweise auch **Dolomit**. Gelegentlich sind auch andere Mineralien erkennbar, an erster Stelle Dolomit, der in Form von **Nestern, Bändern oder Boudins** auftritt. Aufgrund seiner größeren Härte und chemischen Stabilität ist er auch spröder und verwitterungsresistenter, weshalb er oft ein positives Verwitterungsrelief aufweist. Meist ist er auch wesentlich feinkörniger als der ihn umgebende Calcit und oft von gelblicherer Färbung. Die Unterscheidung mittels verdünnter Salzsäure, Färbeverfahren wie Alizarin Rot und/oder Folienabzügen kommt an antiken Objekten kaum in Frage. Gelegentlich lassen sich auch Glimmerplättchen in Nestern oder dünnen Lagen – oft mit feinen Klüften verbunden – feststellen, manchmal auch opake Mineralien wie Pyrit und Einschlüsse von organischem Material z.B. in Form von Graphit. Diese **akzessorischen** Komponenten sind entweder relativ gleichmäßig verteilt oder in bestimmten Bereichen konzentriert. Bei größeren Gehalten entstehen die oben beschriebenen Farben und Muster, die im Extremfall den Übergang zu den Buntmarmoren markieren.
- j) Auch **Verwitterungserscheinungen** einschließlich biogenen Lochfraßes, Verschmutzungen, Bearbeitungsspuren usw. können Auskunft über das Material und seine Interaktion mit der Umwelt geben.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, liegen von Archäologen kaum Beschreibungen der Materialeigenschaften frisch aufgefundener antiker Objekte vor. Dies erschwert die archäometrische Bestimmung enorm und erstaunt umso mehr, als z.B. die archäologische Interpretation eine beträchtliche Beobachtungsfähigkeit für stilistische und sonstige Elemente verlangt. Erst in jüngster Zeit ist im Zusammenhang mit dem wachsenden Interesse an archäometrischen Fragestellungen eine veränderte Einstellung zu beobachten. Im Verlauf dieser Arbeit wurde das obige Bestimmungsschema nach äußeren Merkmalen einschließlich Tabelle 6 erarbeitet, das auch von Nicht-Geowissenschaftlern nach kurzer Einweisung erfolgreich zu einer halbwegs objektiven Beschreibung äußerer Merkmale eingesetzt werden kann. Es ist keineswegs immer notwendig, diese Arbeit an Geowissenschaftler zu delegieren.

Ein besseres Verständnis für die Materialeigenschaften und deren Beschreibung hilft nicht nur dem Geowissenschaftler bei seiner weiteren Untersuchungsarbeit. Es kann auch Enttäuschungen und negativen Gegenreaktionen vorbeugen, falls eine z.B. nur auf Isotopenanalyse beruhende Herkunftsbestimmung unter archäologischen Gesichtspunkten als vollkommen unsinnig erscheint.

Vor allem mit dem Ziel der Anwendung in der Werksteinplattenindustrie wurden in den letzten Jahren Verfahren zur **automatischen Mustererkennung** unter Einbeziehung von computergestützten Expertensystemen entwickelt (MARTÍNEZ-CABEZA-DE-VACA-ALAJARÍN & TOMÁS-BALIBREA 1999; CARRINO *et al.* 2002; PINTO *et al.* 2003). Hierbei wird versucht, Merkmale (Farben, Adern etc.) digitalisierter Aufnahmen der Marmoroberflächen mittels geeigneter Algorithmen (Cluster-Analyse, Fuzzy-Methoden, neuronale Netzwerke) zu klassifizieren und zuzuordnen.

Daneben werden verschiedene Verfahren getestet, um z.B. den Glanz polierter Werksteinoberflächen zu quantifizieren (z.B. ERDOGAN 2000).

In einem jüngst vorgestellten Ansatz (BIRICOTTI & SEVERI 2003; BIRICOTTI & SEVERI 2004) werden aus der diffusen Streuung von mit Laserlicht bestrahlten Oberflächen verschiedene Gefügemerkmale ausgewertet; für die mobile Messapparatur sind lediglich die Laserdiode mit Stromver-

sorgung, Interferenzfilter und Notebook incl. Software erforderlich. Mit der bisher erstellten Datenbank ließen sich verschiedene antike Lagerstätten unterscheiden.

Trotz aller erreichten und noch zu erwartenden Fortschritte hat sich jedoch bisher gezeigt, dass menschliche Experten besonders bei archäometrischen Fragestellungen noch bei weitem überlegen sind, insbesondere wenn komplexe multivariate Merkmalbündel, wie in den Punkten a) - j) erläutert, berücksichtigt werden sollen.

3.2.2 Mikroskopisch bestimmbare Merkmale

Die Verbindung makroskopischer mit mikroskopischen Beobachtungen bildet die Grundlage des Klassifizierungsschemas nach LEPSIUS (1891).

Doch bereits früh warnte der amerikanische Petrologe H. S. WASHINGTON (1898) vor Fehlklassifizierungen insbesondere ohne ausreichende petrographische Kenntnisse. Er zitierte den Fall des Satyrs im Pariser Louvre, der bei einem Autor als "*parisch*", bei einem anderen als "*möglicherweise thassisch, aber sicher nicht parisch*" beschrieben wurde.

HERZ & PRITCHET (1953) zeigten, dass gleiche Epigraphien einmal als hymettisch, ein anderes mal als pentelisch angesprochen wurden. Problematisch in Bezug auf die Forderung nach Reproduzierbarkeit sind heutzutage sicherlich auch Vergleiche der Korngröße mit "*gewöhnlichem deutschen Zucker im Unterschied zu Kolonialzucker*" bei LEPSIUS (S. 15). RENFREW & PEACY (1968) bestritten aufgrund eigener Studien den Aussagewert qualitativer petrographischer Herkunftsbestimmungen sogar vehement. Diese Unstimmigkeiten trugen dazu bei, dass modernere Analyseverfahren zum Zuge kamen, wie bei der Isotopenanalyse zunächst jedoch mit der gleichen Einseitigkeit.

Auch im Licht des Stellenwerts petrographischer Methoden in dieser Arbeit bleibt das Verdienst von Lepsius festzuhalten, zum erstenmal mit systematischer Beobachtung eine Katalogisierung und reproduzierbare Herkunftsbestimmung antiker Marmorobjekte versucht zu haben. Zudem wurden von anderen Autoren (MOLTESEN *et al.* 1992; MOLTESEN 1994) viele der Lepsius'schen Zuordnungen vorwiegend isotopenanalytisch als zutreffend bestätigt.

3.2.2.1 Polarisationsmikroskopie

Dünnschliffe erlauben das Mikroskopieren mit dem Durchlichtmikroskop. Aufgrund der hohen Doppelbrechung der Karbonate (vgl. TRÖGER 1982) sollten sie höchstens 0,01 mm dick sein (ANDREAE *et al.* 1972, S. 403). Orientierte Probenahme ist vorteilhaft, jedoch bei Artefakten häufig nicht möglich. Die Unterscheidung der Karbonate (Dolomit, Calcit, Ankerit usw.) mittels Anfärbeverfahren hat sich bei den Marmoren jedoch nicht als sinnvoll erwiesen (s. Kapitel 4.4.3.1).

Bei niedrigmetamorphen feinkörnigen Marmoren, die noch reliktsche Merkmale von organischem Kalkstein aufweisen, lassen sich unter Umständen fossile Überreste erkennen (MARINOS 1948). Aber auch bei den Marmoren von Lesbos, die MGS um 4 mm und mehr aufweisen, sind fossile Spuren (u.a. Megalodontenschalen) sowohl im Handstück als auch unter dem Mikroskop deutlich erkennbar.

3.2.2.2 Auflichtmikroskopie

Bei Verwendung von Anschliffen kann auflichtmikroskopisch der Bestand an **opaken Mineralien** (z.B. Pyrit, Magnetit, Graphit) qualitativ und quantitativ ermittelt werden. Aber auch die Karbonatminerale, ihre Korngrenzen und Verzwilligungen werden deutlich sichtbar, besonders beim Einsatz von Interferenzkontrasteinrichtungen.

3.2.2.3 Mineralbestand

Wichtigste Hilfsmittel zur Bestimmung des Mineralbestands sind Durchlicht- oder Polarisationsmikroskopie, Auflichtmikroskopie sowie Pulverdiffraktometrie, die hier alle eingesetzt wurden und in den entsprechenden Kapiteln genauer beschrieben werden. Für noch präzisere Aussagen eignen sich die Elektronenmikroskopie (TEM und SEM, bes. zu Gefügemerkmalen s. DAL PINO *et al.* 1999), Mikrosonde (OGILVIE 2001) und andere hochauflösende Verfahren. Nicht vergessen werden sollte jedoch, dass sich bereits mit einfachen Hilfsmitteln (Lupe usw.) wesentliche Feststellungen zum Mineralbestand treffen lassen.

3.2.2.4 Gefügemerkmale

Korngrößenverhältnisse und Kornformen bestimmen wesentlich die Struktur (engl. "*texture*") des Gesteins. Seine Textur ("*fabric*") beruht

auf der Anordnung der Komponenten im Raum, ihrer Einregelung usw.

In den Gefügemerkmalen spiegeln sich die Auswirkungen der Veränderung des Ausgangsmaterials nach der Sedimentation durch Diagenese und Metamorphose während der oft mehrfachen Senkungs- und Heraushebungsprozesse bis zum Entstehen einer abbaufähigen Marmorlagerstätte wieder. Versenkung in größere Teufen bei höheren Temperaturen führt im Prinzip zu Kornvergrößerung (s. MOLLI *et al.* 2000) mit homogener Korngrößenverteilung und geraden Korngrenzen, die sich idealerweise in 120°-Winkeln berühren. Demgegenüber wirken feinverteilte Verunreinigungen als Kristallisationskeime, so dass viele kleine Körner entstehen, deren Umwandlung in große Körner energetisch ungünstig ist. Gefügekundlich lassen sich die die Wachstumsprozesse beeinflussenden Faktoren sowohl an experimentell erzeugten als auch an natürlichen Marmoren mittel geeigneter Modellrechnungen erfassen (für Marmore z.B. MAS & CROWLEY 1996; BERGER 2004).

Variierende Drücke deformieren das Korngefüge; ein heteroblastisches Gefüge mit ungleichen Korngrößen, unregelmäßigen Korngrenzen und vielen oft gebogenen Zwillingslamellen (z.B. COVEY-CRUMP 1998; DE BRESSER *et al.* 2001) ist die Folge; im Extremfall kann es bis zur Mylonitisierung kommen (z.B. BURLINI & KUNZE 2000). Jedoch ist auch der Temperatureinfluss nicht nur auf die Kornwachstumsraten sondern auch z.B. auf die Zwillingsbildungsprozesse (z.B. FERRILL 1998) zu berücksichtigen. Wechselnde Hebungs-, Senkungs- und Rekristallisationsprozesse erzeugen zwischen diesen beiden Grundtypen eine Vielzahl herkunftsindizierender Muster. Schnitteffekte üben sowohl auf die feststellbaren Korngrößen wie auch Kornformen Einfluss aus. Im Normalfall schneidet ein Dünnschliff ein Korn nicht entlang seines größten Durchmesser. Weicht ein Korn von seiner isometrischen Idealgestalt ab und treten noch zusätzlich Orientierungen auf, kann es zu vollkommen irreführenden Interpretationen kommen.

3.2.2.4.1 Korngröße

Die Korngrößenbestimmung kann sich vor allem bei sehr ungleichmäßiger (bi- oder polymodaler) Korngrößenverteilung und unregelmäßigen Kornformen schwierig gestalten und an Aussagekraft verlieren.

Zur Größenmessung eines Mineralkorns stehen grundsätzlich 3 Möglichkeiten zur Verfügung:

- a) Reine Längenmessung (größter, kleinster, mittlerer Durchmesser);
- b) Statistische Längenmaße (Durchmesser nach Feret und Martin, Krumbeins (1935) "maximum horizontal intercept");
- c) Flächenmaße (Durchmesser des flächengleichen Kreises).

Verschiedene Autoren geben Korndurchmesser an, ohne dass immer deutlich wird, wie diese ermittelt wurden. LAZZARINI (1980a) ermittelte Korngrößen verschiedener Vorkommen in mm^2 , indem die Gesamtfläche einer Bildprojektion durch die Kornzahl geteilt wurde.

Bei den eigenen Untersuchungen der Telephosfries-Marmore 1995 wurden entlang einer Traverse im Dünnschliff die längsten Durchmesser und senkrecht dazu die Breite der Einzelkörner gemessen. Dies erlaubt z.B. mittels eines Histogramms eine Vorstellung von der Korngrößenverteilung zu erhalten; auch das Längen/Breitenverhältnis ist so darstellbar.

Teilweise wurde auch der **mittlere Kornanschnitt** ermittelt, indem eine Messstrecke durch die Zahl der geschnittenen Körner geteilt wurde, was zu einem kleineren Korndurchmesser als beim ersten Verfahren führen kann.

Im Prinzip wurde bei den jetzigen Untersuchungen ähnlich verfahren. Allerdings erfolgte angesichts der Vielzahl vorhandener Dünnschliffe die Messung in der Regel nicht direkt am Mikroskop. Vielmehr wurden die **mittleren Korndurchmesser (average grain size, AGS)** durch Ausmessen der Anzahl der Körner entlang mehrerer Messstrecken auf den vergrößerten Dünnschliffaufnahmen (s. Abbildung 31) ermittelt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen unter dem Mikroskop zeigte eine hinreichend gute Übereinstimmung.

Da eine eventuelle Kornlängung auf den Aufnahmen leicht erkennbar ist, wurde parallel zu den langen und kurzen Korndurchmessern gemessen. Der Quotient aus beiden Messstrecken ist ein Maß für die Kornlängung.

Ein besonders nützliches und für den Metamorphosegrad charakteristisches Merkmal ist die **maximale Korngröße (maximum grain size MGS)**. Für ihre Ermittlung wurden die jeweils 3 größten Körner gemessen. Der Quotient aus MGS und AGS kann ein Maß für die Heterogenität bzw. Homogenität des Kristallgefüges sein.

Stark über 2 hinausgehende Quotienten weisen auf ein heterogenes Gefüge hin.

Die so ermittelten Kennwerte von Lagerstätten sind ab S. 105 in Abbildung 77 bis Abbildung 81 graphisch dargestellt.

3.2.2.4.2 Kornformen und Korngrenzen

Kristalloblastese in Wechselwirkung mit Deformationsprozessen beeinflusst neben den Korngrößen die Korngestalt¹². Reiner Calcitmarmor ist xenomorph, Dolomitanteile neigen zu Idiomorphie. Polygonalgefüge mit 120° -Winkeln an mehr oder minder geraden Korngrenzen deuten auf Gleichgewichtszustände hin. Die ausgeprägte drucksensitive Plastizität des Calcits kann sich in Elongationen (senkrecht zur Druckrichtung), Translations- und Deformationszwillingen, optischer Zweiachsigkeit usw. äußern. Neutronendiffraktometrisch wurde bestätigt, dass kurzfristige schnelle Temperaturerhöhungen ohne Auswirkung auf das Gefüge bleiben, wohingegen schon geringer kontinuierlicher mechanischer Stress das kristallographische Gefüge stark verändert (IVANKINA *et al.* 2001). Detailliertere rheologische Untersuchungen haben gezeigt, dass hoher Druck bei 1000 K zunächst zu Kornlängung sowie Orientierung der kristallographischen c-Achsen führt, bei weiterer Druckerhöhung bildete sich jedoch infolge von Subkornrotation und Rekristallisation an neuen Kristallisationskeimen ein gleichkörniges Gefüge (PIERI *et al.* 2001b).

Im Dünnschliff ist besonders die Ausbildung der Korngrenzen von Schnitteffekten relativ unbeeinflusst und in gewissen Fällen ein brauchbares Unterscheidungsmerkmal. Sehr unregelmäßige, gezahnte oder stufige Korngrenzen sind Indikatoren für die Nichteinstellung thermodynamischen Gleichgewichts und/oder postmetamorphen Stresses.

3.2.2.4.3 Möglichkeiten der quantitativen Bestimmung von Gefügemerkmalen

Die Stereologie beschreibt verschiedene Verfahren zur quantitativen Gefügefassung. Grundsätzlich folgen Analyseverfahren (z.B. UNDERWOOD 1970) zur quantitativen Erfassung von Gefügemerkmalen und Mineralphasen drei Grundtypen:

¹² vgl. AUGUSTITHIS (1985)

- Punktanalyse (eindimensional): es wird die Zahl der "Treffer" eines Punktrasters zur Gesamtzahl der Punkte ins Verhältnis gesetzt.
- Linearanalyse (eindimensional): Länge, Punkte oder Anzahl pro Testlinie werden ausgemessen.
- Flächenanalyse (zweidimensional): gravimetrisch (ausschneiden und wiegen), optisch (Videokamera und Detektor) oder planimetrisch (Digitalisiertableau). Durch Umfahren der Form kann auch ein komplexerer "Formfaktor" bestimmt werden (z.B. GERMANN *et al.*, 1988, s. Abbildung 233 auf S. 173). In Fortsetzung dieses Verfahrens haben in jüngerer Zeit für die Auswertung der Korngrenzenränder z.B. das SHAPES-Programm (PANOZZO & HÜRLIMANN 1983) Verwendung gefunden. Der hierbei ermittelte PARIS-Faktor ist ein Maß für die Konvexität/Konkavität der Korngrenzengeometrie. Eine weitere Verfeinerung ist die *quantitative fabric analysis* (SCHMID *et al.* 1999). An 63 Proben von 14 Brüchen aus 6 Lagerstädtendistrikten konnten 6 Brüche unterschieden werden, wobei die mittleren ln-transformierten Durchmesser sowie der PARIS-Faktor die höchste Diskriminanzfunktion aufwiesen.

Angesichts der sehr hohen Aussagekraft der Dünnschliffaufnahmen und einer großen Anzahl geochemischer Daten erwiesen sich in dieser Arbeit die im Kapitel 3.2.2.4.1 skizzierten quantitativen Korngrößenangaben der Linearanalyse als vollkommen ausreichend.

3.2.2.4.4 **Regelungsgrad**

Gefügeuntersuchungen¹³ mittels U-Tisch (SANDER 1950) und Röntgentexturgoniometer (SCHULZ 1949) ermöglichen Aussagen über Orientierungen der optischen Achsen der Calcitkörner und ihrer Zwillingslamellen, und können so z.B. der Zusammenfügung von Fragmenten und der Herkunftsbestimmung dienen. Bei stark rekristallisierten, grobkörnigen Marmoren sind reliktsche Gefügestrukturen mit Einregelungen

der kristallographischen c-Achsen in der Regel kaum noch erkennbar (vgl. aber DE WALL *et al.* 2000). Neuere Verfahren verwenden in Anlehnung an die Achsenverteilungsanalyse von Sander die Computer Integrated Polarisationsmikroskopie (CIP) (HEILBRONNER *et al.* 1993), wobei die Interferenzfarben jedes Pixels einer Serie digital aufgenommener Dünnschliffe für die Bestimmung der Orientierung der c-Achse dienen. Allerdings sind angesichts der hohen Doppelbrechung des Calcits Ultradünnschliffe erforderlich. Vorzugsorientierungen der Kornachsen können mittels Verfahren wie PAROR, die Symmetrie der Orientierung der Korngrenzenoberflächen mittels der SURFOR-Methode (PANOZZO 1983, 1984) bestimmt werden.

Zwar nimmt auch in dieser Arbeit die Verwendung digitalisierter Dünnschliffaufnahmen breiten Raum ein. Trotz gewisser Fortschritte (zuletzt SCHMID & FLAMMER 2002; MARINONI *et al.* 2003) erwies sich jedoch eine automatisierte Auswertung am PC mit einem vertretbaren Aufwand nicht als sinnvoll. Die unterschiedlichen Interferenzfarben drücken nicht unterschiedliche Mineralphasen aus, wovon bestehende Auswertungssoftware ausgeht, sondern unterschiedliche Schnittlagen der gleichen Phase, in der Regel von Calcit. Verschärft wird diese Problematik noch durch die häufige Anwesenheit von Zwillingsdomänen.

Als günstigstes und einfach handhabbares Verfahren hat sich die Kombination der bei den Korngrößen beschriebenen quantitativen Verfahren (Linearanalyse mit MGS, AGS und diverse Quotienten) mit qualitativen Beschreibungen erwiesen, wobei die direkte Verwendung der Gesamtdünnschliffaufnahmen nicht nur anschaulich ist, sondern auch die detailliertesten Informationen liefert (s. z.B. Kapitel 4.4.2).

Erst nach Abschluss der Arbeiten hat sich herausgestellt, dass in einigen Fällen zusätzliche Gefügeuntersuchungen die diskriminatorische Aussagekraft mancher Herkunftsbestimmungen möglicherweise weiter verbessert hätten (s. z.B. Kapitel 6.4.7).

¹³ S. TURNER (1953) über Zwillingslamellen, HERZ (1953), HERZ & PRITCHET (1953), WEISS (1954), HERZ (1955), BAUTSCH & KELCH (1960), ANDREAE *et al.* (1972), EILERT (1978).

3.2.3 Pulverdiffraktometrie (XRD)

Eine routinemäßige Methode zur Bestimmung des Mineralbestands ist die Pulverdiffraktometrie. Hierzu sind lediglich einige Milligramm Probenmaterial erforderlich. Sie ist besonders nützlich, wenn nur Bohrpulver zur Verfügung steht.

Gegenwärtig sind Mineralgehalte bis unter 1 Gew% feststellbar und können nach Eichung auch quantitativ bestimmt werden. Bei reinen Marmoren ist vor allem der Gehalt an Dolomit schnell ermittelbar. Von wenigen Ausnahmen (z.B. LAZZARINI & MARIOTTINI 1987) abgesehen, wird bei archäometrischen XRD-Marmoranalysen meist nur angegeben, ob Dolomit vorhanden ist oder nicht. In dieser Arbeit wird hingegen die Fläche unter den Dolomitpeaks herangezogen, um halbwegs quantitative Aussagen zum Dolomitgehalt treffen zu können.

Auch zur Bestimmung von Elementgehalten in **Mischkristallen** ist die Pulverdiffraktometrie prinzipiell geeignet. Je nach Ionenradius verändern Kationen die Größe des Kristallgitters und damit die Netzebenenabstände, was sich in einer Verschiebung bestimmter Peaklagen niederschlägt. Diese Methode findet bei Karbonaten besonders Anwendung zur Ermittlung des Mg-Anteils in Calcit: die kleineren Mg-Ionen verschieben unter anderem die Lage des (104)-Röntgenreflexes, was bei hinreichender Kalibrierung und Eichung recht genaue Aussagen über die Mg-Gehalte des Calcits erlaubt. Voraussetzung ist allerdings, dass andere Kationen im Gitter nur in vernachlässigbaren Mengen vorhanden sind.

Bei der in dieser Arbeit erfolgten pulverdiffraktometrischen Erfassung von Calcit, Dolomit und Quarz (Kapitel 4.5) zeigte sich eine gute Korrelation der Dolomit-Gehalte mit den nassanalytisch ermittelten Mg-Werten.

3.2.4 Elektronenspinresonanzspektroskopie

Seit den 1980er Jahren (CORDISCHI *et al.* 1983; LLOYD *et al.* 1985; CORDISCHI *et al.* 1988; bes. MANDI *et al.* 1992; ARMIENTO *et al.* 1997) entwickelte sich die ESR-Spektroskopie bzw. Elektroparamagnetische Resonanzspektroskopie (EPR) zu einem der populärsten Verfahren für Marmorherkunftsbestimmungen. Besonders Art und Höhe der Mn^{2+} -Peaks im ESR-Spektrum sind aufschlussreich, aber auch andere Parame-

ter wie Fe-Gehalte, Korngrößen, radiogene Gitterbaufehler usw. fließen ein. Als aussagekräftigste Parameter erwiesen sich die aus den ESR-Peaks berechneten Mn-Gehalte. Sie korrelieren sehr gut mit den NAA-Messwerten, liegen aber meist etwas höher (BAIETTO *et al.* 1999). Die g-Werte um 2,00 werden von Punktdefekten im Karbonatgitter beeinflusst, die u.a. auf SO_3^- -Radikale oder mechanische Behandlung zurückgehen.

Ein Vorzug dieses Verfahrens ist der geringe Probenbedarf (<100 mg). Unterdessen haben vor allem italienische und griechische Forschergruppen umfangreiche Datenbanken erarbeitet. Die Vorstellung ihrer Ergebnisse nahm auf den letzten archäometrischen Tagungen einen breiten Raum ein (MANIATIS & POLIKRETI 2001; POLIKRETI & MANIATIS 2002; ATTANASIO *et al.* 2003b; ATTANASIO *et al.* 2003c; FISCHER 2003; MANIATIS *et al.* 2003; POLIKRETI & MANIATIS 2003a). Eine ausführliche Darstellung der Methodik mit vielen Lagerstättenbeispielen findet sich in dem Buch von D. ATTANASIO (2003).

Bei allen Vorzügen des Verfahrens und nach langjähriger Kalibrierungsarbeit hat sich jedoch gezeigt, dass alleine die ESR-Variablen zur Lagerstättendiskriminierung nicht ausreichen. Deshalb verfolgen alle Autoren einen multivariaten Ansatz unter Einbeziehung zusätzlicher Merkmale wie MGS, Geruch, Farbe usw. (z.B. ATTANASIO *et al.* 2000). Letzterer und die griechische Arbeitsgruppe um Y. Maniatis untersuchten auch mehrere unserer Proben (Kapitel 4.11). Leider ist in den mittels Diskriminanzanalyse erstellten Zuordnungsdiagrammen die Gewichtung der einzelnen Merkmale nicht erkennbar und auch nicht gesondert aufgeführt. Da zudem die ESR-Analyse quasi nur als externe Dienstleistung in Anspruch genommen wurde und ihre Aussagen bzgl. der prokonnesischen Marmore sich mit unseren Ergebnissen decken, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine detailliertere Beschreibung der Methode verzichtet.

3.2.5 Kathodolumineszenz (KL)

Seit den Arbeiten von MARSHALL (1988) hat die der Karbonatsedimentologie entlehnte Auswertung von KL-Mikrofazies in Kombination mit anderen Methoden eine weite Verbreitung bei der Herkunftsbestimmung einiger weißer Marmore gefunden (RAMSEYER *et al.* 1989; BARBIN *et al.* 1990; CHAMAY *et al.* 1990; COSTEDOAT & ALVINERIE 1991; BARBIN *et al.* 1992; HERRMANN & BARBIN 1993). FIORENTINI & HOERNES (1994) setzten sie in Verbindung mit Isotopenanalyse zur Charakterisierung von Funden aus dem Wrack von Mahdia ein. Auch für hispanische Marmore besteht unterdessen eine breitere Datenbasis (LAPUENTE *et al.* 2000, 2003). Das KL-Anwendungsgebiet ist durchaus umfassender, so im Rahmen von Untersuchungen zur Gesteinskonservierung im Marmorpalais Potsdam (WEISS *et al.* 1999). Weitere archäometrische Untersuchungsergebnisse sind zu erwarten (BLANC *et al.* 2003; MENTZOS *et al.* 2003; UNTERWURZACHER *et al.* 2003). Einem jüngerem Überblick (SCHMID *et al.* 1999) wurde die Abbildung 12 entnommen.

Die KL beruht auf der Lumineszenz von Marmoren - d.h. der Lichtemission nach Anregung mit einem Elektronenstrahl -, welche u.a. in Abhängigkeit von der Konzentration an Mn (vgl. CORAZZA *et al.* 2001) und Fe im Calcit ein charakteristische Intensität und Verteilung aufweist.

Auch einige unserer Proben wurden mittels KL untersucht. Dabei zeigte sich, dass prokonnesische Marmore nicht nur die in der Literatur zitierte blaue, sondern auch eine schwach orangene KL-Mikrofazies aufweisen.

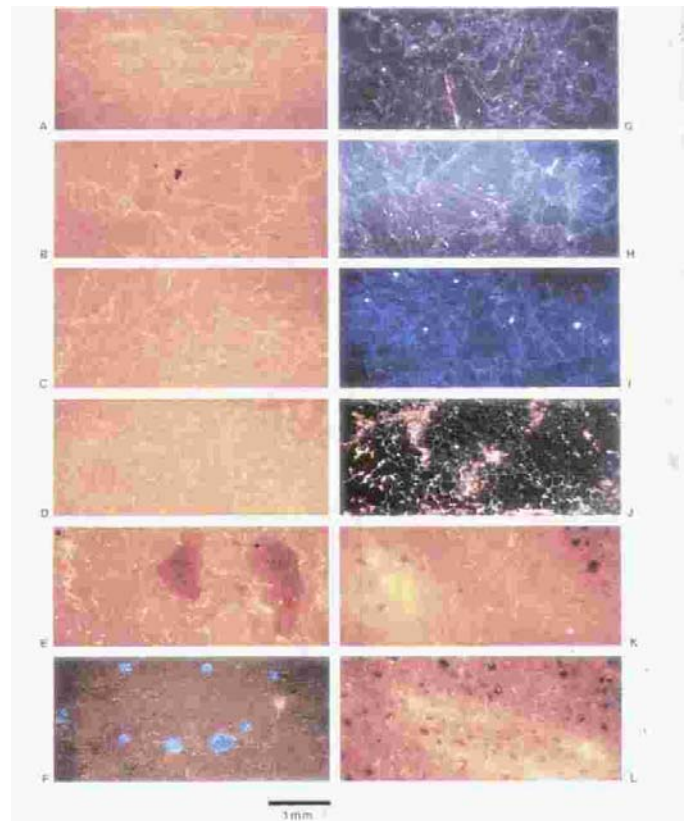


Figure 5. Cathodoluminescence micrographs of specimens discussed in text. Scale bar (3 mm) for all specimens. For each specimen, location and exposure time of CL micrographs (as indicated), followed by the specimen number in parentheses: (A) Naxos: Fiero, 20 x (89-62); (B) Naxos: Kimaloros, 8 x (89-59A); (C) Naxos: Karmos, 8 x (89-43.2); (D) Paros: St. Basil, 15 x (P x 1.1); (E) Paros: St. Basil, 50 x (P x 46.3); (F) Elima: Ancient quarry 1, 120 x (89-129); (G) Paros: Ancient quarry 2, 90 x (89-122); (H) Paros: Loukaios, 45 x (PA 77); (I) Marmara: 240 x (174.2); (J) Delos: 120 x (89-178); (K) Corfu: Mergis, 15 x (2. Ca. 3.1); (L) Naxos: Mt. Zent, 80 x (89-07B.2).

Abbildung 12: Kathodolumineszenzmikrofazies klassischer Marmore. Im Original (SCHMID *et al.* 1999) zeigen die Schlitze A-E und K-L einen deutlich orangenen Farbton

Es muss festgehalten werden, dass Farbe und Intensität der KL-Mikrofazies stark von der Bestrahlungsintensität und -dauer abhängen. Deshalb ist für eine Vergleichbarkeit neben einer präzisen Kalibrierung immer auch die Angabe der Geräte- und Messparameter erforderlich. Ein weiteres Problem kann sein, dass bei geringen Probenmengen die Wahl zwischen der Anfertigung von Dünnschliffen oder der für die KL erforderlichen polierten Dickschliffe getroffen werden muss.

3.3 Geochemische Merkmale

Die mit dem Einsatz empfindlicherer Messgeräte einhergehende anfängliche Begeisterung für geochemische Untersuchungsmethoden zur Marmorprovenienzanalyse hat sich seit den Arbeiten von RYBACH & NISSEN (1965) zwischenzeitlich gelegt. Nichtsdestotrotz können sie wertvolle Informationen liefern.

Die Problematik ergibt sich vor allem aus drei Gründen, die als Sonderfälle der allgemeinen Schwierigkeiten für die Herkunftsbestimmung von Marmoren und damit der Notwendigkeit eines multivariaten Ansatzes zu betrachten sind:

Erstens kann die Elementverteilung innerhalb der meisten Abbaugebiete stärker streuen als zwischen diesen.

Zweitens erfasst ein Teil der vorliegenden Untersuchungen den Gesamtchemismus des Marmors, der vor allem bei den Spurenelementen stark durch die zufällige Verteilung akzessorischer Minerale¹⁴ beeinflusst werden kann (RFA, INNA). Die nassanalytischen Methoden (ICP-MS, OES, AAS etc.) erfassen demgegenüber den säurelöslichen Anteil, also vor allem die im Calcitgitter eingebauten Elemente. Hierbei gibt es noch einmal Unterschiede im Aufschlussgrad der verwendeten Säuren, der sich auf die Anlösung akzessorischer Mineralien (z.B. Pyrit) auswirken kann.

Drittens können nicht nur verschiedene analytische Techniken an gleichen Marmoren zu durchaus unterschiedlichen Ergebnissen führen, sondern auch die Verwendung gleicher Methoden durch verschiedene Labors.

Von den im folgenden beschriebenen geochemischen Messtechniken wurden bei den früheren Untersuchungen am Telephosfries die RFA, ICP-MS, AAS und Graphitrohrofen-AAS eingesetzt, bei den jetzigen Untersuchungen hingegen fast ausschließlich ICP-MS und ICP-OES.

¹⁴ S. die systematische Erfassung ungleicher Mineralverteilungen an 75 Proben antiker Marmorlagerstätten (CAPEDRI *et al.* 2004).

3.3.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die RFA ist vor allem zur Bestimmung von Haupt- und Nebenelementen geeignet. Die Gehalte an Spurenelementen bei weißen Marmoren liegen meist nahe der Nachweisgrenze des Verfahrens.

Deshalb finden sich lediglich für die Bestimmung nicht nur weißer Marmore einige Anwendungsbeispiele (CONFORTO *et al.* 1975; CABRAL *et al.* 1992, S.191; GORGONI *et al.* 1992, S.155).

Aufgrund des hohen Reinheitsgrades der wichtigsten antiken Marmore, des starken Einflusses akzessorischer Mineralien auf den Gesamtchemismus und des relativ hohen Probenbedarfes wurde im weiteren Verlauf weitgehend auf RFA-Untersuchungen verzichtet.

3.3.2 Bestimmung des Ca/Sr-Verhältnisses

LAZZARINI *et al.* (1980)¹⁵ postulierten für einige Marmorvorkommen signifikante herkunftstypische Unterschiede im Verhältnis Ca:Sr. Hierbei wurden allerdings nicht die absoluten Elementgehalte gemessen und verglichen. Vielmehr handelt es sich um ein abgewandeltes RFA-Verfahren, bei dem die Proben z.B. mit ¹⁰⁹Cd bestrahlt und die Flächen unter einem Ca- und Sr-Peak ins Verhältnis gesetzt werden. Jüngere Anwendungen dieser Methode sind nicht bekannt.

3.3.3 Instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse

Durch Beschuss mit Neutronen (in Kernreaktoren) werden Atome in kurzlebige radioaktive Nuklide umgewandelt, die Gammastrahlung elementspezifischer Wellenlänge und Intensität emittieren.¹⁶ Diese Technik ist sehr aufwändig, komplex, teuer und nur an wenigen Laboratorien verfügbar, zumal für sie ein Kernreaktor erforderlich ist.

Eine Auswertung der Literatur zeigt, dass die INAA bis vor kurzem die bei Marmoren am meisten angewendete Methode zur Spurenelementbestimmung im ppm- bis ppb-Bereich

¹⁵S.a. MARGOLIS & SHOWERS in HERZ *et al.* (1988, S.233) über Verwitterungskrusten, GORGONI *et al.* (1992, S. 155) über Mani-Marmore in WÄLKENS *et al.* (1992).

¹⁶Details der Methode werden z.B. bei ODDONE (1984) und GRIMANIS *et al.* (1987) beschrieben.

war¹⁷: RYBACH & NYSSSEN (1965), CONFORTO *et al.* (1975), MELLO *et al.* (1980, 1983, 1988a, b), ODDONE *et al.* (1985), GENOVA *et al.* (1986), MOENS *et al.* (1988a, b), GRIMANIS *et al.* (1988), JONGSTE *et al.* (1992, S.257), MOENS *et al.* (1992, S.269)¹⁸ und DULIU *et al.* (1999).

Ein Vergleich zwischen den INAA-Messwerten von MOENS *et al.* (1988b) und MELLO *et al.* (1988b) für Marmore von Carrara und Marmara verdeutlicht, welche große Unterschiede bestehen können (Tabelle 7): MOENS *et al.* (1988b) meinen aufgrund der Konzentrationsbereiche z.B. Hf als Diskriminanzelement deuten zu dürfen: 5,3-30 ppb für Carrara, 1,5-5 ppb für Marmara. MELLO *et al.* (1988b) geben für die gleichen Vorkommen 170±40 bzw. 70±10 ppb Hf an. Für La sind es 230-1060 (6000±4200 bei Mello) bzw. 1,9-1070 (16.800±900) ppb. Ähnliche Abweichungen um Größenordnungen treten auch bei anderen Elementen auf¹⁹.

		Hf ppb	La ppb
Carrara	MOENS <i>et al.</i> (1988b)	5,3-30	230-1060
	MELLO <i>et al.</i> (1988b)	170±40	6000±4200
Marmara	MOENS <i>et al.</i> (1988b)	1,5-5	<1,9-1070
	MELLO <i>et al.</i> (1988b)	70±10	16.800±900

Tabelle 7: INAA-Messwerte für Marmore von Carrara und Marmara nach MOENS *et al.* (1988b) und MELLO *et al.* (1988b)

Mittels INAA wurden bis zu 30 Spurenelemente in Marmoren erfasst. Diese Datenmenge lässt sich nur mittels multivariater Statistik auswer-

¹⁷So schreibt auch HERZ (1992): "Because of the overlap in isotopic values of many important Classical quarries, other ancillary methods of analysis are proving invaluable. Most important of these are neutron activation trace analysis combined with a statistical treatment of the data, cathodoluminescence, ESR, and Sr isotopic analysis."

¹⁸Hier wird auch von JONGSTE *et al.* (1992, S.263) ein Vergleich zwischen ICPAES und INAA vorgenommen, der für die karbonatgittergebundenen Elemente Sr, Fe, Na, Ca und Zn ähnliche Werte ergab, während andere Elemente stärker abweichen.

¹⁹MELLO *et al.* (1988a) geben aufgrund von Diskriminanzanalyse Yb, Th, Sc und Cs als effektivste Variablen für Klassifizierungszwecke an.

ten, insbesondere Diskriminanz- und Clusteranalyse kommen zur Anwendung.

Nach Einschätzung von MATTHEWS *et al.* (1995) haben INAA-Spurenelementanalyse und Isotopenanalyse für sich alleine jeweils eine ähnliche Unterscheidungskraft. Miteinander kombiniert ergäben sich hingegen bei der Unterscheidung von 4 Lagerstätten zwischen 91 und 99% korrekter Zuordnungen. In der jüngsten publizierten INAA-basierten Datenbank von MATTHEWS (1997) sind 183 Proben aus 8 Lokalitäten enthalten.

In einem weiteren Ansatz wird auf die SEE (chondrit-normiert) und einige abgeleitete Werte (Summe der SEE, Verhältnis der leichten zu schweren SEE, La/Yb) fokussiert (MELONI *et al.* 1995). Zwar ähnelt dieser Ansatz dem hier eingesetzten Verfahren, auch wenn weder die Normierung auf PAAS erfolgt, noch die besondere Rolle von Cer und Y Berücksichtigung findet. Dies mag auch an der Beschränkung auf eine Lagerstätte (Carrara) liegen. Es zeigt sich zudem, dass ihre Messwerte nicht mit den hier – allerdings sehr wenigen – ermittelten von Carrara zusammenpassen.

Dies dürfte vor allem an der INAA-inhärenten Erfassung des Gesamtgesteinchemismus liegen, in die auch die akzessorischen Mineralien eingehen, die gerade in Carrara-Marmoren recht verbreitet auftreten. Auf diese Problematik wurde von verschiedenen anderen Autoren hingewiesen, die ebenfalls der Erfassung der säurelöslichen, in das Karbonatgitter eingebauten Elemente, den Vorzug geben (MANDI *et al.* 1995). Für Spurenelementanalysen z.B. bei Keramiken, wo der Gesamtchemismus erfasst werden soll und zudem eine Säurelösung sehr aufwändig wäre, ist INAA hingegen noch immer Mittel der Wahl.

3.3.4 Spektrometrische Elementbestimmung

Bei den verschiedenen spektrometrischen Verfahren werden die Elemente (meist durch Säuren) in Lösung gebracht, die Elektronen der Atome durch thermische Energiezufuhr angeregt und die Konzentration über eine Messung der Spektren (Absorption oder Emission) quantitativ bestimmt²⁰.

²⁰Näheres zum Verfahren z.B. bei HEINRICHS & HERMANN (1990).

Anwendungen zur Marmorcharakterisierung sind zahlreich (z.B. ANDREAE *et al.* 1972; CONFORTO *et al.* 1975; GAST 1976; GERMANN *et al.* 1980; LONGERICH *et al.* 1987; GERMANN *et al.* 1988; JONGSTE *et al.* 1992; JONGSTE *et al.* 1995; MÜLLER *et al.* 1996; AKCAY *et al.* 1999; CAMPANELLA *et al.* 2001; KRITSOTAKIS *et al.* 2003; LAZZARINI 2003), und der Umfang der nassanalytisch-spektrometrisch ermittelten Datenbasis antiker Marmorlagerstätten dürfte der INAA-basierten mittlerweile nahe kommen, wenn nicht gar sie übertreffen.

Die Nachweisgrenzen der verschiedenen Methoden verbessern sich - je nach Element - in der Reihenfolge AAS<ICP-AES<ICP-MS bis unterhalb des ppb-Bereichs. Ebenfalls sehr empfindlich ist die Graphitrohrofen-AAS. ICP-MS (Massenspektroskopie) mit Nachweisgren-

zen für die meisten Elemente zwischen 0,01 und 0,1 ng/ml und der Möglichkeit zur Serienmessung kann unterdessen erfolgreich mit der INAA konkurrieren, zumal mit 0,2 g der Probenbedarf wesentlich geringer ist als bei der INAA, ebenso wie Kosten und Aufwand, und sie leicht verfügbar ist.

Die Verbesserung der Nachweisgrenzen eröffnet unterdessen auch anderen optimierten Messverfahren neue Anwendungsmöglichkeiten für die Lagerstättendiskriminierung, so beispielsweise der kapillaren Elektrophorese, mit der bis zu 10 Spurenelemente erfasst wurden (YUCEL & DEMIR 2004).

Die geochemischen Merkmale der hier untersuchten Marmorproben wurden weitgehend spektrometrisch (ICP-MS und ICP-OES) bestimmt.

3.4 Stabile Isotope

Sauerstoff, Kohlenstoff und untergeordnet Strontium sind in Marmor reichlich vertreten. Ihre Isotopenverhältnisse in unterschiedlichen Gesteinen hängen von ihrer geologischen Geschichte ab – und spiegeln sie damit auch wider²¹. Da die Signaturen stabiler Isotopen von Kohlenstoff und Sauerstoff sowohl in der allgemeinen Marmorcharakterisierung als auch bei dieser Arbeit eine wichtige Rolle spielen, wird der Stand der Forschung hier ausführlicher dargestellt, während in Kapitel 4.7 die eigenen Messergebnisse diskutiert werden.

3.4.1 Entwicklung der Methode für die Marmorcharakterisierung

Ersten Isotopenuntersuchungen bei Karbonaten mit dem Ziel der Erstellung einer Paläotemperaturskala (MCCREA 1950) folgte die Beobachtung unterschiedlicher Isotopensignaturen für Marmore aus verschiedenen Gebieten (BAERTSCHI 1957; SHEPPARD & SCHWARCZ 1970). Bei erstmals für Zwecke der Archäometrie isotopengeochemisch untersuchten Marmoren (CRAIG & CRAIG 1972) wurden 5 Marmore den Vorkommen von Penteli, Paros, Hymettos und Naxos zugeordnet.

Die extreme Streuung der Isotopenwerte weißer und farbiger Marmore aus 5 westanatolischen Steinbrüchen (Afyon, Denizli, Aphrodisias, Ephesos und Marmara) konnte zunächst durch eine Beschränkung auf die weißen Marmore eingegrenzt werden (MANFRA *et al.* 1975). Ein besseres Verständnis der Isotopenvariationen besonders des Sauerstoffs brachten Untersuchungen auf Naxos (RYE *et al.* 1976).

Einige spektakuläre Ergebnisse schienen die universelle Aussagekraft der Isotopie zu bestätigen, so die Zuordnung von 3 von 6 Inschriften griechischer Marmore mit Stelai und der Nachweis von 3 falschen Zuordnungen (HERZ & WENNER 1978), oder von Sarkophagen im Britischen Museum zu pentelischen und prokonnesischen Quellen (COLEMAN & WALKER 1979).

GERMANN *et al.* (1980) steuerten weitere Daten (25 von Steinbrüchen, 9 von Museen) thessalischer Marmore aus Atrax, Kastriion, Gonnos und Tempi bei und warnten angesichts der starken

Überlappung vor der Gefahr falscher Zuordnungen bei unkritischer und einseitiger Verwendung der Isotopenwerte. Sie zeigten die wesentlich höhere Aussagekraft petrographischer Merkmale ihrer Proben zur Herkunftsbestimmung und plädierten für einen multivariaten Ansatz bei der Herkunftsbestimmung.

Bei Feldarbeiten auf Paros (GERMANN *et al.* 1988) konnten neben den Lychnites zwei weitere – als Paros-2 und Paros-3 bezeichnete – antike Bruchgebiete mit unterschiedlichen Isotopensignaturen identifiziert werden. Diese Arbeit trug dazu bei, dass sich die Einsicht in die Notwendigkeit eines multivariaten Ansatzes für die Marmorherkunftsbestimmung weiter durchsetzte. Nach einer ersten Bestandsaufnahme (HERZ 1987) wurden 590 Datensätze aus 42 klassischen Abbaugebieten Griechenlands, der Westtürkei, Tunesiens und Carrara sowie 192 Analysen aus 16 Steinbrüchen, die potentiell im Neolithikum (Frühe Bronzezeit) Verwendung fanden (HERZ 1992)²², publiziert. Norman Herz hat seine Originaldatenbasis auch für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Schon bald (MATTHEWS *et al.* 1992) musste das 1987 von Herz definierte Isotopenfeld von nachweislich in der Antike benutzten pentelischen Marmoren in Richtung schwererer Sauerstoffisotopen erweitert werden. MOENS *et al.* (1992, S. 276) erstellten auf der Basis des damaligen Kenntnisstandes (eigene Daten und Daten von HERZ 1987; GERMANN *et al.* 1988) ein Isotopendiagramm, das auch in dieser Arbeit verwendet wird.

Jedoch kommen fast tägliche neue Isotopendaten hinzu und die Felder dehnen sich nicht nur in alle Richtungen aus, sondern getrennte Isotopenfelder innerhalb eines Lagerstädtendistrikts beginnen zu größeren Feldern zu verschmelzen. Diese Entwicklung wird sicherlich nicht bei den jüngst veröffentlichten Feldern (GORGONI *et al.* 2002) Halt machen. Um überhaupt noch eine gewisse Übersichtlichkeit zu bewahren, erfolgt dort eine Unterteilung nach fein- und mittel-grobkörnigen Lagerstätten; zusätzlich sind Einzeldiagramme für die wichtigsten Marmorlagerstätten abgebildet. Deshalb auch wird in dieser Arbeit das nicht mehr ganz aktuelle Diagramm von MOENS *et al.* (1992) weiter verwendet, das zumindest die

²¹ vgl. FAURE (1986).

²² Vorgestellt auf der Konferenz: "Archaeological Stone: Scientific and Technical Studies" im Britischen Museum vom 14.-16. November 1991, *Archaeometry* 34, 2.

Kernzonen der Isotopiefelder noch einigermaßen übersichtlich erkennen lässt (Abbildung 13). Zudem entstammen die meisten hier untersuchten Marmore kleinasiatischen Lagerstätten, für die, wenn überhaupt, bisher nur wenige Isotopendaten

veröffentlicht worden sind. Eine detaillierte Darstellung der Marmorisotopiefelder einschließlich aus eigenen Messdaten konstruierter Felder erfolgt in Kapitel 7.2.

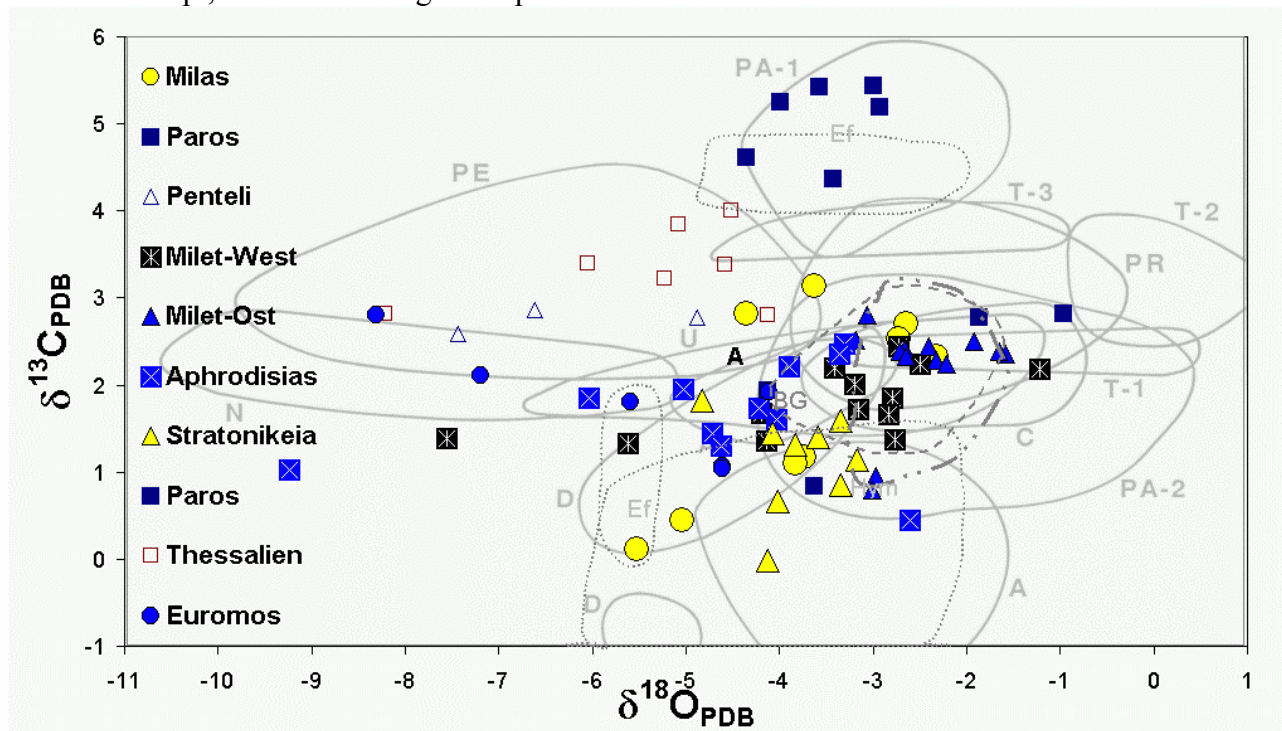


Abbildung 13: In dieser Arbeit verwendete PDB-normierte C-O-Isotopiefelder nach MOENS *et al.* (1992) und HERZ (1987) mit Messwerten untersuchter Marmorlagerstätten. Lediglich die ins Penteli-Feld fallenden thessalischen Marmore werden nicht weiter behandelt, da sie keinen Bezug zum Arbeitsgebiet aufwiesen. A: Aphrodisias, C: Carrara, D: Dokimeia, N: Naxos, PA: Paros, PE: Penteli, PR: Prokonnesos, T: Thasos, U: Uşak, zusätzlich BG: Bafa-See, Ef: Ephesos, Hym: Hymettos

3.4.2 Sr-Isotopie

Als zusätzliches Isotopenmerkmal mit Diskriminanzfunktion wird das Verhältnis von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ untersucht (HERZ *et al.* 1982; HERZ 1992; ZÖLDFÖLDI & SATIR 2002; BRILLI *et al.* 2004a; BRILLI *et al.* 2004b), allerdings bis jetzt ohne eindeutige Ergebnisse²³. Generell wird eine Abhängigkeit des Verhältnisses der radiogenen Sr-Isotopen von der Meerwasserzusammensetzung zum Zeitpunkt der Karbonatsedimentation angenommen – mit der hieraus folgenden Möglichkeit, aus dem Sr-Isotopenverhältnis das Alter des Gesteins abzuleiten (z.B. MELEZHIK *et al.* 2001). Aber auch fluide Phasen im Zusammenhang mit magmatischen und metamorphen Prozesse können die Signatur ändern (HAYATSU *et al.* 1965; BRASS 1976; BREVART & ALLEGRE 1977; BAKER *et al.*

1982; BURKE *et al.* 1982; ELDERFIELD *et al.* 1982; DEPAOLO & INGRAM 1985; HESS *et al.* 1986; SCHLIESTEDT *et al.* 1987; LYONS *et al.* 2002). Die Sr-Isotopiemessung kam in dieser Arbeit nicht zum Einsatz.

3.4.3 Geochemische Grundlagen

Die 92 natürlichen Elemente bilden insgesamt 270 stabile und 70 radioaktive Nuklide, die bei gleicher Protonenzahl unterschiedliche Neutronenzahl besitzen. Nur wenige Reinelemente wie Be, F, Na bestehen lediglich aus einer Nuklidsorte. Isotope unterscheiden sich nur in ihrem Atomgewicht. Sie treten in der Natur in bestimmten Mengenverhältnissen auf, die entsprechend den Bildungsbedingungen variieren können. Bei Kohlenstoff kommen das ^{12}C -Isotop mit dem Atomgewicht 12,0000 mit 98,89% Anteil und das ^{13}C -Isotop mit dem Atomgewicht 13,00335 mit 1,11% Anteil in natürlicher Häufigkeit vor. Das durch Höhenstrahlung induzierte und für

²³ Für Thasos-Aliki betragen diese 0,70769-0,70792, für Paros 0,70757 und Pentelikon 0,70830 (HERZ 1988, S. 310). Neueste Angaben für 8 klassische Brüche reichen von 0,7071 to 0,7092 (BRILLI *et al.* 2004b).

Altersbestimmungen²⁴ organischen Materials geeignete radioaktive ¹⁴C tritt nur in Spuren auf. Die natürliche Zusammensetzung²⁵ von ¹⁶O, ¹⁷O und ¹⁸O liegt bei 99,759%, 0,037% bzw. 0,204%. Das Verhältnis zwischen 2 Isotopen wird durch den R-Wert ausgedrückt:

$$\delta(R) = \frac{R_{Pr} - R_{St}}{R_{St}} * 1000$$

mit $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ oder ${}^{18}\text{C}/{}^{16}\text{C}$

R_{Pr} = Isotopenverhältnis Probe

R_{St} = Isotopenverhältnis Standard

Die Abweichung δ (Angabe in Promille ‰) bezieht sich auf einen ausgewählten Standard. Dieser ist für Sauerstoff meist das **SMOW** (Standard Mean Ocean Water). In der archäometrischen Marmorforschung hat sich aber für C und O der von Craig eingeführte **PDB-Standard**²⁶ durchgesetzt. Die Umrechnung erfolgt nach der Formel²⁷:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = 0,97006 * \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - 29,94$$

Durch geeignete chemische Behandlung (üblicherweise Auflösung in Phosphorsäure) wird CO₂ freigesetzt und seine Isotopenanteile nach präzisen Vorschriften (CRAIG 1957; CRAIG &

²⁴ Die stabilen C/O-Isotopen haben grundsätzlich nichts mit Altersbestimmung zu tun. Doch trotzdem heißt es in dem ansonsten ausgezeichneten und anschaulichen Buch „Calciumkarbonat“ zu „Methoden der Herkunftsbestimmung von Marmoren“ (TEGETHOFF *et al.* 2001, S. 90): „Da nicht jedes Isotop eines Elements gleich stabil ist, ändert sich ihr Verhältnis im Laufe der Zeit und gibt dadurch Aufschluß über das Alter eines Marmorvorkommens.“ Und dann: „...kann man die Herkunft durch Vergleich mit Daten bekannter Brüche einfach und zumeist exakt feststellen. Gelegentlich(!) auftretende Überschneidungen zwischen 2 Brüchen können durch eine Kombination aller Methoden endgültig beseitigt werden“. Drei Seiten vorher wird der wohl grobkörnigste in der Antike verwendete Marmor überhaupt, der von Naxos, als feinkörnig bezeichnet.

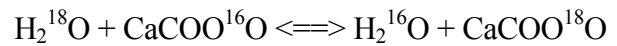
²⁵ RIEDEL (1990).

²⁶ CO₂ von *Belemnitella americana* aus der Kreide der PD-Formation Südkarolinas (USA).

²⁷ SEIM *et al.* (1990).

CRAIG 1972) mit einem Massenspektrometer gemessen.

Isotopen-Fraktionierungsprozesse werden im Wesentlichen durch transportkinetische, reaktionskinetische und thermodynamische Effekte hervorgerufen. Isotopenaustausch kann auch zwischen verschiedenen Verbindungen stattfinden. Für Calciumkarbonat und Wasser ist eine mögliche Reaktion:



mit der Gleichgewichtskonstante $K=1,031$ bei 25°C²⁸.

Allgemein kontrollieren folgende Faktoren die isotopischen Fraktionierungseffekte:

- leichtere Atome können eher variieren;
- das schwerere Isotop neigt dazu, sich in der bindungsstärkeren und kondensierten Phase anzureichern;
- niedrigere Temperaturen begünstigen die Fraktionierung; so ist Sauerstoff magmatischer Bildungen "leichter" mit geringerer Streuung, während Sedimente schwereren Sauerstoff akkumulieren und auch eine breitere Streuung aufweisen; Metamorphite nehmen eine Mittelstellung ein.
- Andererseits ist der Temperatureffekt z.B. bei Wasser zu berücksichtigen: mit abnehmender Temperatur nimmt $\delta^{18}\text{O}$ ab²⁹.

3.4.4 Isotopenvariationen bei Karbonaten

Als wesentliche Faktoren, die die Isotopenverhältnisse von Sauerstoff und Kohlenstoff bei Karbonaten kontrollieren, führt HERZ (1987)³⁰ an:

- Ursprung des Karbonats als chemische Ausfällung oder Ansammlung organischer Skelettfragmente oder beides;
- Isotopenzusammensetzung des mit den Karbonatmineralien assoziierten Wassers während ihrer Bildung und danach;

²⁸ a.a.O, S. 164.

²⁹ $\delta^{18}\text{O} = 0,69 * \Delta T - 13,6\text{‰}$ (a.a.O, S.205).

³⁰ nach FAURE (1986).

- Umwandlungstemperatur von Kalkstein zu Marmor;
- Isotopenfraktionierung mit Porenwasser und anderen Mineralien während der Metamorphose;
- spätere Verwitterungsgeschichte.

So können Marmore, die in einer bestimmten Region gleichzeitig entstanden sind, eine charakteristische Isotopensignatur annehmen. Damit aber eine gleichmäßige Isotopenverteilung über ein weiteres Gebiet geochemisch signifikant erhalten bleibt, ist aber die Erfüllung folgender Bedingungen erforderlich:

- a) der Protolith wurde in gleichartiger Umgebung abgelagert und diagenetisch verändert;
- b) während der Metamorphose stellte sich ein Isotopengleichgewicht ein und blieb erhalten;
- c) die vorzugsweise rein calcitische Marmoreinheit ist homogen und hinreichend mächtig,
- d) der Metamorphosegradient war nicht zu steil.

Grundsätzlich kann die Migration von Lösungen in Marmoren entweder entlang der Korngrenzen oder über Gitterdiffusion durch die Körner selbst erfolgen. Bei nicht vollständig homogenisierten Marmoren wurde am Kornrand eine Verarmung schwerer Sauerstoffisotopen beobachtet (WADA *et al.* 1998), während das Korninnere unverändert blieb, die Kohlenstoffisotopie hingegen weist über den gesamten Kornbereich konstante Werte auf. Daraus kann geschlossen werden, dass die Veränderung der Sauerstoffisotopie durch die Korngrenzen kontrolliert wird, die der Kohlenstoffisotopie hingegen durch Gitterdiffusion. Die Gitterdiffusionsrate von O-Isotopen wird als sechs mal schneller als von C-Isotopen angegeben, aber die Diffusion von O-Isotopen entlang von Korngrenzen übertrifft die durch das Calcitgitter um den Faktor 10 (WADA *et al.* 1998). Hierin dürfte eine wesentliche Ursache für die Beobachtung liegen, dass die Spannweite der Sauerstoffisotopie in Marmorlagerstätten sehr groß sein kann.

Hohe $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in Kalkstein und Marmor sprechen für einen wesentlichen Anteil an anorganischem CaCO_3 , sei es detritisch oder als chemisches Ausfällungsprodukte³¹ bzw. Evaporite

(zuletzt GULIY & WADA 2003). Bei stark variierenden $\delta^{13}\text{C}$ -Werten kann eine starke Durchmischung anorganischen karbonatischen Materials und organischer Gerüstfragmente angenommen werden. Schon früh wurde jedoch der relativ enge Bereich der δC -Variation bei Marmoren erkannt (HAHN 1966).

Schon die Fraktionierung von Sauerstoffisotopen in Kalken unterliegt verschiedenen Einflüssen:

- Biogene Karbonate (wobei verschiedene Pflanzen und Tiere - auch innerhalb ihrer Bauteile - schon Unterschiede zeigen) fraktionieren anders als chemische Ausfällungen.
- Die jeweilige isotopische Zusammensetzung meteorischen, limnischen oder marinen Wassers während und nach der Kalksteinbildung macht sich bemerkbar. So zeigen im Flachwasser nahe des Meeresspiegels bei 30°C gebildete Karbonate bis 6‰ höhere ^{18}O -Werte als solche bei etwas über 0°C am Meeresgrund gebildete (s. Fußnote 29).

deren ^{18}O -Werte aber bis 1,6‰ auseinanderliegen, letzteres auf fehlendes Isotopengleichgewicht mit wässrigen Lösungen im Areal zurück. Die hohen ^{13}C -Werte sollen von Algen-Karbonaten und Travertinen herrühren; CRAIG & CRAIG (1972) machten für hohe δC -Werte (>4‰) bei parischen Marmoren hingegen frühen chemischen Ursprung verantwortlich.

³¹MANFRA *et al.* (1975) führen bei 3 Proben vom gleichen Steinbruch bei Ephesos mit hohen ^{13}C Werten (>4),

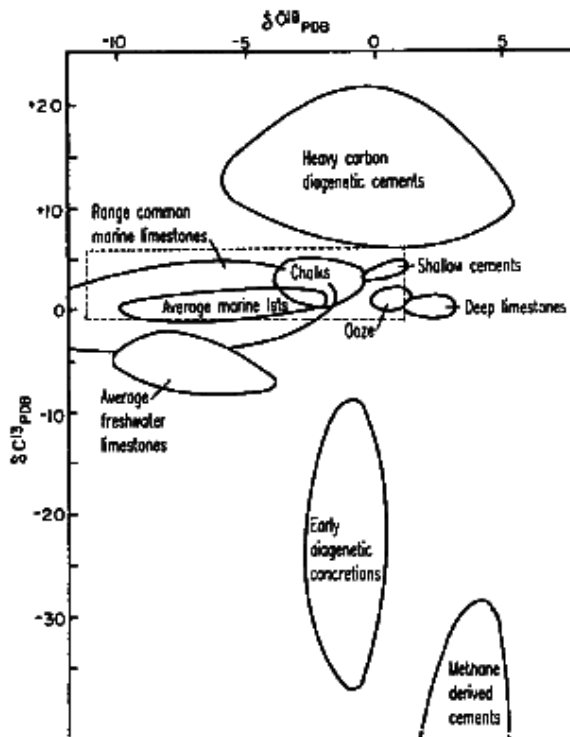


Abbildung 14: C-O-Isotopenvariation in Kalksteinen nach ANDERSON & ARTHUR (1983). Das gestrichelte Rechteck umhüllt den Bereich antiker Marmore.

Die isotopische Variationsbreite verschiedener Kalksteine veranschaulicht die von WENNER *et al.* (1988) nach ANDERSON & ARTHUR (1983) modifizierte Abbildung 14. Hier fällt auf, dass sich die isotopische Zusammensetzung der klassischen Marmore nicht sehr von den meisten potentiellen Kalksteinedukten unterscheidet und $\delta^{18}\text{O}$ insgesamt um etwa 15‰ variiert. Bei naxischen Marmoren sind beispielsweise ähnliche Größenordnungen der Sauerstoffisotopenvariation bekannt. Das $\delta^{13}\text{C}$ der eigentlichen Kalksteine variiert ebenfalls in einer ähnlichen Größenordnung. Jedoch sind die durch meteorische Einträge und biologische Aktivitäten beeinflussten δC -Variationen in Zementen und Konkretionen sowohl in Richtung leichterer als auch schwererer Kohlenstoffisotope mit insgesamt über 50‰ beträchtlich größer. Demgegenüber reicht das $\delta\text{C}_{\text{PDB}}$ -Spektrum bei Marmoren nur selten über +5 und -1 ‰ hinaus. Detaillierter wird auf die isotopischen Variationen anhand eigener Messwerte in Kapitel 4.7 und da besonders Abbildung 48 eingegangen.

Gleichgewichtsreaktionen zwischen Calcit und Graphit sind ebenfalls denkbar und werden bei der Erstellung von Geothermometern ($\delta\text{C-T}$) eingesetzt (KITCHEN & VALLEY 1995; ATTENDORN & BOWEN 1997, S. 471 ff.; CHEN *et al.*

2000; SATISH-KUMAR *et al.* 2002). Der Isotopenaustausch mit Silikaten oder Oxiden kann demgegenüber bei reinen Marmoren als unbedeutend betrachtet werden³². Experimentell wurde in Quarziten eine hundertfach langsamere ^{18}O -Korngrändiffusion nachgewiesen (FARVER & YUND 1998).

Die Abnahme von ^{18}O bei der Metamorphose von Kalksteinen wird stark vom vorherrschenden Temperaturgradienten kontrolliert. Bei niedrigen T-Gradienten (<15°C/km) und den oben unter a-c geforderten Bedingungen sind relativ homogene ^{18}O -Signaturen zu erwarten. Steile Temperaturgradienten können hingegen beträchtliche Veränderungen hervorrufen. So zeigt die Studie von RYE *et al.* (1976) auf Naxos starke Variationen der Isotopengehalte bei unterschiedlichen Metamorphosegraden³³. Die Bildungstemperaturen nehmen über eine Strecke von 12 km von 360°C im SW der Insel bis auf 700°C in der Nähe eines Migmatitdomes im Zentrum zu. Profile von zwischen Schiefen eingeschalteten Marmorbänken zeigen an den Rändern eine starke Verarmung an schweren C- und O-Isotopen³⁴; bei niedriggradiger Metamorphose ist dies auf wenige Zehner cm beschränkt, während die Isotopenwerte im Inneren relativ konstant bleiben. Dies spiegelt die Tatsache wider, dass Marmore bei niedriggradiger Metamorphose recht impermeabel für Flüssigkeiten sind, die sich infolgedessen vor allem entlang der Marmor/Schiefergrenzen bewegt haben. Bei höheren Metamorphosegraden ($T > 585^\circ\text{C}$) treten vor allem für Sauerstoff $_{\text{SMOW}}$ selbst im Inneren eines 18 m breiten Blocks starke Variationen von über 10‰ auf (bei C_{PDB} sind es fast 6‰). Permeabilitätsänderungen durch die Kornvergrößerung bei der Rekristallisation³⁵

³² Umgekehrt stellte sich das Karbonat-Silikatgleichgewicht z.B. bei einer 20 m dicken Marmorbank auf Naxos-Apollonas mit einer Abnahme von ^{18}O um -6‰ von der Mitte zum Schieferkontakt ein (HERZ & WÄLKENS 1988, S.309).

³³ Noch komplizierter gestalten sich die Verhältnisse dadurch, dass die hier beschriebene, etwa 23 Ma alte Kontaktmetamorphose teilweise eine 40-50 Ma alte Hochdruckmetamorphose überprägt (vgl. KREULEN 1988).

³⁴ Hierfür werden CO_2 -reiche Fluide verantwortlich gemacht (VALLEY 1986).

³⁵ KREULEN (1988).

mögen eine Ursache sein, die Öffnung von Inhomogenitätsflächen durch freiwerdendes CO₂ bei Dekarbonisierungsreaktionen mit silikatischen Mineralien (z.B. Wollastonit) eine andere. Letzteres bringt ebenfalls eine Abnahme schwererer O-Isotope mit sich, ist aber für archäologisch relevante (reiner!) Marmore von geringerer Bedeutung. Bei noch höhergradiger Metamorphose konnte jedoch keine bedeutendere weitere ¹⁸O-Verarmung festgestellt werden.

Demgegenüber postulieren LEWIS *et al.* (1998) nach zusätzlichen Mn-, Fe- und Kathodolumineszenzanalysen, dass die Verarmung der schweren Sauerstoffisotopie naxischer Marmore nicht durch metamorphogene Fluide hervorgerufen worden sei, sondern vorwiegend infolge meteorischer Einträge (Regenwasser).

An grobkörnigen japanischen Marmoren, die im Anschluss an eine Granulit- eine Amphibolit-Fazies-Metamorphose mit fluidier Infiltration durchlaufen hatten, wurde entlang von Korngrenzen und Rissen eine starke Verarmung von ¹⁸O und Sr bei Anreicherung von Fe und Mn nachgewiesen (GRAHAM *et al.* 1998). Diese Bereiche unterschieden sich auch in ihrer gelben Kathodolumineszenzfarbe deutlich von der purpurnen der unveränderten Kornbereiche (vgl. KL-Abbildung 67, Akkaya).

Die von CRAIG & CRAIG (1972) festgestellten zwei Isotopencluster der Naxos-Marmore, die nach Untersuchungen von GERMANN *et al.* (1988) zu einem durchgehenden δO-Gürtel von -10,47 bis -2,62‰ erweitert wurden, der unterdessen bis <-15‰ reicht, sind mit solch starker Metamorphose und Wechselwirkung mit Fluiden in Verbindung zu bringen. Ähnliche Prozesse spielten sich auf Marmara ab, wo die von uns beobachtete Existenz eines zweiten O-Isotopenfeldes mit niedrigeren δO-Werten in prokonnesischen Marmoren auch von anderen Forschergruppen festgestellt wurde.

Von WENNER *et al.* (1988) an 24 Proben durchgeführte Untersuchungen an relativ reinen, homogenen, mittelgradig metamorphisierten Marmoren des *Tate Marble Quarry* (USA) zeigen hingegen bei δ¹³C lediglich Variationen um 0,9‰ und bei δ¹⁸O um 2,8‰ an. Kleinere Handstücke sind isotopisch noch homogener.

Untersuchungen von MATTHEWS *et al.* (1999) auf der westlichen Kykladeninsel Tinos (vgl. auch LAZZARINI & ANTONELLI 2003) an einer Hochdruck-Calcit-Marmoreinheit, die einer niedriggradigeren Dolomitmarmoreinheit aufliegt, brachten den überraschenden Befund, dass die Calcite und auch Quarz eine starke Verarmung schwererer Sauerstoffisotope erfahren hatten (wie auch von δC im Marmor), während die koexistierenden Dolomite selbst in der Mylonitisierungszone durch die Fluide praktisch keine isotopische Veränderung erfuhren, obwohl sie durch die Metamorphose auch gefügemäßig stark verändert wurden (Abbildung 15).

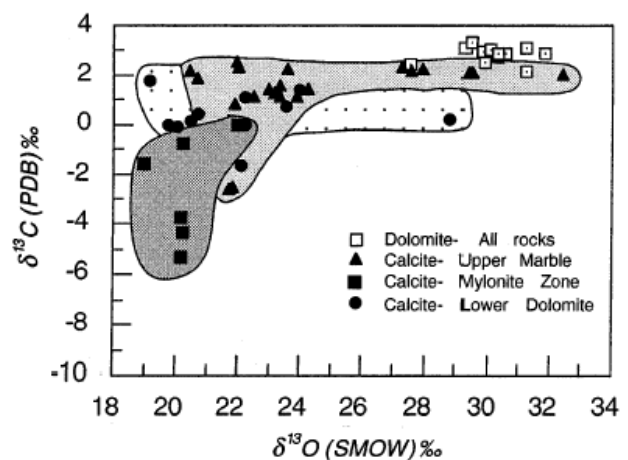


Fig. 5 δ¹³C vs δ¹⁸O plot for calcite and dolomite. Dolomites are grouped together, whereas calcites are grouped according to the rock-type from which they are sampled

Abbildung 15: Isotopendiagramm von Dolomiten und Calciten auf Tinos (MATTHEWS *et al.*, 1999)

Dies lässt sich allerdings nicht verallgemeinern. So zeigte sich z.B. bei unseren Marmorproben von Marmara, dass an gleichen Platten mit wechselnden dolomitischen und calcitischen Lagen die Isotopie einheitlich ist oder die dolomitreichen Partien sogar eine stärkere Verarmung der schweren δC- und δO-Isotope aufweisen.

3.4.5 Verwitterungseinflüsse

Marmor ist an der Erdoberfläche zahlreichen Verwitterungseinflüssen ausgesetzt, die sich aus konservatorischer Sicht bei Kunstwerken besonders dramatisch auswirken (s. Kapitel 4.2.1). Die Folgen der Interaktion mit Feuchtigkeit, Temperatureinflüssen und Gasen (bes. CO₂) auf die Isotopenverteilung sind ein Sonderfall des

allgemeinen Verwitterungsverhalten von Marmoren (Kapitel 2.5.8).

Einfluss auf die Verwitterungsgeschichte antiker Marmorartefakte hat auch deren seitheriger Lagerungsort, sei es im Boden, in einem Brunnen oder an der freien Atmosphäre. 50 Jahre alte mediterrane Verwitterungskrusten zeigten Veränderungen bis 0,7‰ bei den Sauerstoffisotopen und bis 0,2‰ bei den Kohlenstoffisotopen (HERZ 1985). Untersuchungen von WENNER *et al.* (1988) an Marmoren in humiden Klimazonen belegten allerdings ein geringeres Ausmaß isotopischer Veränderung zwischen Marmorinnerem und seiner Oberfläche. Dies könnte daran liegen, dass häufigere Niederschläge die Verwitterungskrusten wegschwemmen, während sie bei Unterbrechungen durch längere Trockenperioden, wie im Mittelmeerraum üblich, die Isotopensignatur der kohlendioxidhaltigen Niederschläge annehmen und konservieren.

In jedem Fall sollte für Herkunftsbestimmungen mittels Isotopenuntersuchungen auf möglichst tief unter der Oberfläche liegendes frisches Material zurückgegriffen werden, was aufgrund konservatorischer Gesichtspunkte jedoch nicht immer möglich ist. Künstliche "Verwitterungseinflüsse" bei der Probenahme und Präparation sind ebenfalls zu vermeiden (BARRERA & SAVIN 1987). Bohrer sollten möglichst niedrigtourig und trocken gefahren werden. Frühere Messungen zwischen (im Achatmörser) pulverisier-

ten Proben und im ganzen aufgelösten Splittern vom Telephosfries hatten keine signifikanten Abweichungen ergeben.

3.4.6 Zusammenfassung

Die Isotopensignatur von Marmoren vermag ein nützlicher Herkunftsindikator sein, vorausgesetzt ihre Entstehungsumstände und die Grenzen der Methode finden hinreichende Beachtung. Schon innerhalb eines Calcitkornes kann es zwischen Rand und Korninnerem zu starken Variationen besonders der Sauerstoffisotopie kommen, so dass das Messergebnis einen von der Probenmenge abhängigen Mischwert darstellen kann, was einen wichtigen Vorzug der Isotopie (den geringen Probenbedarf) teilweise konterkariert.

Entsprechend größer können die Variationen in ganzen Steinbruchgebieten ausfallen, und gelegentlich ist ihr Ausmaß selbst schon ein Herkunftsindikator. Auch deshalb sollten sämtliche gemessenen Isotopenwerte für die Aufnahme in eine Datenbank berücksichtigt und nicht statistisch eliminiert werden. Diese Variationen wären unproblematisch, gäbe es nicht zugleich ausgeprägte Überlappungen sowohl innerhalb als auch zwischen verschiedenen Marmorlagerstättendistrikten. Deshalb darf die Isotopiemesung für die Provenienzanalyse nur gemeinsam mit weiteren petrographischen und sonstigen Merkmalen eingesetzt werden.

4 Eingesetzte Methoden und Merkmale zur Charakterisierung der Marmore

4.1 Überblick der Beobachtungen in antiken Stätten und Steinbrüchen

Die während der Geländearbeiten aufgesuchten Marmorbruchgebiete und antiken Stätten sind in Tabelle 8 zusammenfassend dargestellt. Größerer Wert wurde auf die Aufnahme sonstiger Werksteine gelegt, die entweder lokal anstehen oder wegen spezieller Eigenschaften importiert worden sind. Auf der Karte in Abbildung 4 wurden bereits die zwischen 1975 und 2000 von der Arbeitsgruppe Germann untersuchten Marmorlagerstätten im östlichen Mittelmeerraum

gekennzeichnet. Abbildung 16 und Abbildung 17 kennzeichnen die Lage der für diese Arbeit relevanten Marmorsteinbruchgebiete sowie antiken Stätten. Im Kapitel 5 werden relevante diskriminatorische Merkmale diskutiert, im Kapitel 6 die Lagerstätten beschrieben. Die Zuordnungen der antiken Objekte zu Lagerstätten sind in Tabelle 29 zu Beginn des Kapitels 7 knapp beschrieben und werden im Anschluss detailliert begründet.

Ort (von N nach S)	Antike Stätte/ Marmor-LS	PrH	Verwendete Gesteine	Marmormerkmale (auch Laborwerte)
Thasos	A/LS	Q	Dolomit- und grobkörniger Calcitmarmor, seit 6. Jh. v.u.Z. bis rezent, große Vorkommen und Blöcke, leichter Seetransport, in antike Stätten bes. auch Schiefer	
Marmara (Prokonnesos)	LS, antike Fundstücke in Halden	Q	Sehr große Vorkommen, weite Verbreitung seit 3. Jh. v.u.Z., bes. Rom bis Byzanz und rezent, große Blöcke, leichter Seetransport Weiß mit grauer, paralleler Bänderung, heterogenes von Dynamometamorphose geprägtes Gefüge, MGS 3,5 mm, Geruch nach H ₂ S, ΣSEE/Y:1, Ce _{neg} 0,2	
Troja (Ilion)	A/LS Bigahalbinsel	M	Marmor (u.a. Marmara und Bigahalbinsel)	
Lesbos (Mytilene) Moria	A/LS	Q	Lokales vulkanisches Gestein, tw. Schiefer, Granodiorit von Kozak, in Museum Mytilene evtl. auch prokonnesischer Marmor (3.Jh. v.u.Z.), sehr viel dunkler Marmor – oft mit hellen Fossilresten - von großer LS Moria, auch in Pergamon anzutreffen	
Pergamon Stadt- u. Tempelanlage auf Akropolis seit 3. Jh. v.u.Z.	A	M Q	Andesit, Granodiorit (Kozak) Marmorimport: Marmara, Ephesos, Lesbos (dkl), Thasos, Hymettos, evtl. Naxos ; keine Verwendung lokaler Marmor-Quellen von Kozak-Steinbrüchen	
Ephesos Größte Stadt- u. Tempelanlage in Kleinasien, s. 6. Jh. v.u.Z.	A/ lokale LS (40 Steinbrüche, tw. Export, auch nach Pergamon)	Q	Vorw. Marmor aus meist lokalen Quellen, importierte Kalksteine u. Schiefer	Weiß, meist mk-gk, hom, wenig Akz. Geleg. m. Dol, mehrere Isotopenfelder
Magnesia am Mäander Stadt- und Tempelanlage	A	M Q	Marmor (meist regional), „Buntmarmor“, Kalkstein, Schiefer	u.a. dol-reicher, f-mk, het. Marmor in antiken Steinbrüchen 20 km N
Bafa-See Ehemals offener Meeresarm im Einzugsbereich der Marmorhülle des Menderes-Massivs	LS + A: Herakleia	Q	Marmorsteinbrüche von Herakleia, Gneis	Weiß, m-gk, hom, Fe 10-50, Mn <10
	LS: Milet West und Ost	Q	Lieferant für Milet und Didyma	Weiß f-mk, oft dolomitische Lagen
	LS am NW-Ufer (gegenüber Burgass Adasi)	Q	Antike Abbauspuren, aber unklar wo verwendet	Weiß, oft gebändert, viel Dolomit
Milet Bedeutende Stadt, arch. – röm.	A	M	Fundamente: Kalkstein, Schiefer, Gneis Tempel etc: Marmor (Bafa-See), röm. Theater Marmara? Tw. Hangschuttbrekzien, Andesit (aus Pergamon?)	
Didyma Heiligtum von Milet	A	M	Lokale Kalksteine Marmor aus Brüchen am Bafa-See, Thasos, (Marmara?)	
Priene Stadt und Burganlage	A/lokale LS	M Q	Meist lokaler Marmor, tw. auch Phourni-Insel, Hangschuttbrekzien	oft grünlich (oft m. Dol), f-mk, het, Fe 30-200, Mn 5-20, Sr 60-90
Samos Tempelanlagen, besonders Heraion s. 6.Jh. v.u.Z.	A/ lokale LS	M Q	Lokale Marmore (und Kalksteine) und von Insel Phourni	fk, mit dünnen Dolomitscharen
Myus Stadt im 4 Jh. v.u.Z. Aufgegeben	A/LS?	M	Gneis, Schiefer, Kalkstein, Marmor Lag in Antike an Mäanderarm	LS wahrscheinlich zwischen NW-Ufer Bafa-See und Mykale
Euromos Zeustempel	A/lokale LS	Q	Wohl nur lokaler Marmor auf Anhöhe oberhalb Tempelanlage	Weiß-grünlich, dunkle Bänderung, f-mk, het, Fe 300-900, Sr 100-300, Mn 30-70, ΣSEE/Y:3-6, Ce _{neg} : 1
Milas Bedeutende Stadtanlage, kaum noch erhalten	LS in umgebenden Bergen /antik	Q	Milas „weiß“, „lilac“, „gold“, „bordo“ (rot)	f-mk, tw. gk Varianten, weiß mit wenig Mg, Mn, Sr
Aphrodisias Römische Stadt und Tempelanlage	LS, A, berühmte Bildhauerschule	Q	Marmor	Weiß, m-gk, het-hom, große LS, weit verbreitet, auch graue Varianten beschrieben
Stratonikeia Stadt	A	-	Marmor, Herkunft unbekannt (Muğla?)	Weiß, mk,
LS bei Stratonikeia W von Karalti	LS	Q	Antiker Abbau > 18.000 m ³ , nicht in Stratonikeia-Stadt, weiß, f-mk, feine dkl. Bänderung und rote Flecken, Lilaç-Typ, geleg. Dol, viel Fe, Mn, wenig Sr	

Legende: LS: Lagerstätte, A: antike Stätte, PrH: Probenherkunft (M: Proben aus Museum, Q: Proben aus Quarry - Steinbruch), f-m-gk: fein-mittel-grobkörnig, MGS: maximum grain size, het/hom: heterogenes / homogenes Gefüge, Dol: Dolomit, Akz: akzessorische Minerale, Angaben chemische Elemente in ppm, Ce_{neg}: negative Ce-Anomalie bei Normierung auf PAAS (1= nicht vorhanden, 0,1: sehr ausgeprägt, ΣSEE/Y: Verhältnis Summe Seltener Erdelemente zu Y; Thasos und Lesbos wurden erst nach Ende der Projektlaufzeit aufgesucht.

Tabelle 8: Untersuchte Lagerstätten und antike Stätten mit verwendeten Werksteinen und Merkmalen



Abbildung 16: Mit Probenmaterial belegte relevante Marmorlagerstätten und antike Orte im Ägäisraum. Helle Zahlen in Rechtecken symbolisieren heutige Straßenbezeichnungen



Abbildung 17: Karte antiker Orte und mit Probenmaterial belegter Marmorlagerstätten in der westlichen Menderesregion; nur Samos und Phourni wurden nicht aufgesucht.

4.2 Probennahme im Gelände und Museum

Die Entnahme von Proben im Gelände erfolgte anlässlich verschiedener Exkursionen, zwei

davon mit Professor Heilmeyer und Dr. Kästner von der Berliner Antikensammlung in die westanatolischen Untersuchungsgebiete. Dabei war wegen der häufigen Mitnahme von „Souvenirs“

und Diebstahls historischer Objekte in archäologisch relevanten Gebieten neben der Einholung der erforderlichen Genehmigungen die Rücksprache mit Museumsleitungen und Behörden geboten, auch wenn wir lediglich Proben aus Steinbrüchen für geowissenschaftliche Untersuchungen entnommen haben. Dies half zudem, unseren Kenntnisstand über die Zusammenhänge von archäologischen Objekten und ihrer Umgebung zu verbessern (Tabelle 8). Daneben erhielten wir viele nützliche Hinweise und selbst Führungen zur Lokalisierung relevanter Lagerstätten. Antike Steinbrüche sind häufig im Gelände schwer auffindbar, oft nur anhand vorgelagerter Abschlagshalden. Bevorzugt wurde dort Probenmaterial entnommen, wo antike Abbauspuren erkennbar waren. Aber auch anderes repräsentatives geologisches Probenmaterial einschließlich Magmatiten und Schiefern wurde entnommen. Zusätzlich konnte auf seit 1976 akkumulierte Bestände aus Marmorabbaugebieten zurückgegriffen werden (s. Kapitel 3.1).

Das archäologische Probenmaterial fiel zumeist im Rahmen von Restaurierungsarbeiten an. Diese wurden notwendig, um den beschleunigten Verwitterungs- und Zerfallsprozess seit ihrer Verbringung ins Museum aufzuhalten. Bei den Reliefplatten des Pergamonaltars haben die im 19. Jahrhundert angebrachten Eisendübel und -klammern eine höchst zerstörerische Wirkung entfaltet: in Verbindung mit Gips und Feuchtigkeit kam es zur Volumenausdehnung, deren Sprengwirkung ganze Partien fragmentierte.



Abbildung 18: Sprengwirkung von verrostenden Eisendübeln am Telephosfries

Während der Restaurierungsarbeiten erfolgte eine möglichst vollständige Dokumentation der

makroskopischen Merkmale, die mit bloßem Auge oder einer Lupe erkennbar waren. Einige Fragmente wurden vor ihrer Wiedereinfügung unter dem Binokular betrachtet.

Vom Milet-Marktort konnte Probenmaterial in großer Menge entnommen werden, da seine ausgebohrten Säulenkerne im Archiv der Antikensammlung eingelagert sind (s. Abbildung 251). Anders verhielt es sich bei den meisten anderen unter archäologisch relevanten Gesichtspunkten entnommenen Proben (s. Kapitel 2.1 und 7.1). Hier wurde mittels Hohlbohrern an verdeckten Stellen Material entnommen, wo möglich in Form dünner Bohrkern, oft aber auch nur als kleine Fragmente. Bei einigen Objekten reichte das Material nur für Isotopen- und geochemische Analysen. Hier bleibt zu hoffen, dass dieses Material einigermaßen repräsentativ für den Gesamtarmor ist. Vergleichende Untersuchungen an antiken Objekten mit mehr Probenausbeute zeigen jedoch an, dass dies bei den weißen Marmoren meist der Fall ist. Am problematischsten dürften unregelmäßig wechselnde Dolomitgehalte sein. Wo möglich, wurden regelmäßig Dünnschliffe angefertigt, gelegentlich auch Anschliffe. Weiteres Material wurde an verschiedene Labore für ESR-, Kathodolumineszenz- und gaschromatographische Untersuchungen verschickt. Das gesamte Probenmaterial wird nach dem endgültigen Abschluss der Arbeiten und seiner Katalogisierung in Räumen der Antikensammlung archiviert, um für zukünftige Marmorcharakterisierungen und Herkunftsbestimmungen zur Verfügung zu stehen.

	Probenzahl	Petrograph. (Dünnschl.)	XRD	ICP-MS	ICP-OES	Isot.
39 Antike Objekte	230	215	69	121	109	184
30 Lagerstätten	362	220	113	167	259	236
davon LS nur Ger- mann					104 (AAS)	42
Gesamtzahl	582	435	182	297	368	420

Tabelle 9: Anzahl der Proben und Art der Messungen an antiken Objekten und Lagerstätten

Insgesamt wurden 39 Museumsobjekte beprobt; während bei manchen nur eine Probe entnommen werden konnte, wurden alleine vom Großen Fries des Pergamonaltars an 30 Reliefplatten 62 Proben untersucht. Von 30 Lagerstätten

und Steinbrüchen wurden 362 Proben untersucht, hierin sind allerdings auch Dünnschliffe und geochemische Daten aus früheren Messungen der Arbeitsgruppe Germann insbesondere von den Kykladen und der Bafaseeregion enthalten (Tabelle 9). Die petrographischen Untersuchungen erfolgten meist an den 219 angefertigten sowie bereits vorhandenen Dünnschliffen und 36 Anschliffen. Daneben wurden auch 30 Proben für KL-, ESR- und gaschromatographische Untersuchungen entnommen. Im Anhang (10.3) sind die Probenanzahl und relative Häufigkeiten sowohl der untersuchten Lagerstätten als auch Museumsobjekte detailliert aufgeführt; in 10.14 die petrographischen und geochemischen Messwerte der 590 Datensätze, soweit sie in einer Tabelle erfasst werden konnten. Eine übersichtlichere Tabelle der beprobten antiken Objekte, Untersuchungsmethoden und Lagerstättenzuordnungen findet sich am Beginn des Kapitels 7.1. Die Marmorlagerstätten selbst werden detailliert in Kapitel 6 besprochen.

4.2.1 Restaurierungsarbeiten

Die vom italienischen Team unter Leitung von Silvano Bertolin ausgeführten Restaurierungsarbeiten am Pergamonaltar umfassten mehrere Schritte:

- Wässerung der herausgelösten Platten über Nacht in einem Bassin (Abbildung 19), anschließende Reinigung mit einer Bürste, Herausmeißeln anklebender Zement- und Gipsreste bzw. deren Entfernung mit einem feinen Hochdruckwasserstrahl. Die oftmals praktizierte Reinigung der Oberfläche mit Säure unterblieb.



Abbildung 19: Wässerung von Marmorreliefplatte durch das Restauratorenteam Bertolin

- Entfernung alter Dübel und Klammern;
- Vertiefung der Bohrlöcher bzw. Anbringung neuer Bohrungen, dabei Probenahme (Abbildung 20); wo möglich mit einem wassergekühlten Diamanthohlbohrer als Bohrkern, andernfalls mit einem Widiabohrer als Pulver; die ersten cm Bohrpulver wurden zur Vermeidung oberflächennaher Kontaminationen verworfen; auch einige kleinere Fragmente fielen an, das Probenmaterial wurde in beschrifteten Polyethylenbeuteln aufbewahrt.



Abbildung 20: Entnahme eines Bohrkerns am Telephosfries

- Imprägnierung der zusammenzufügenden Oberflächen mit Epoxidharz, Einbringen von Edelstahldübeln in die mit Epoxidharz ausgefüllten Bohrlöcher, Zusammensetzung der anschließend bis zur Trocknung des Harzes zusammengepressten Teile.

4.3 Makroskopische Untersuchungen - Äußere Merkmale

Einige der in Tabelle 6 auf Seite 32 zur Erleichterung der Bestimmung äußerer Merkmale auch für Nichtgeowissenschaftler beschriebenen Eigenschaften seien hier an Beispielen erläutert. Die Farbe kann ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal von Marmoren sein. In der unteren Bildtafel aus dem Katalog von Mielsch sind aus der Kategorie der „Buntmarmore“ vor allem die weißen und graugebänderten Varianten dargestellt (Abbildung 21). Da wir es aber vorwiegend mit weißen bis grauen Marmoren zu tun haben, genügte neben dem direkten optischen

Vergleichen die Angabe des Farbeindrucks nach der Munsell Rock-Color Chart (MUNSELL COLOR 1995). In ihr steht z.B. N9 für hellweiße Farben, N7 für hellgraue, N1 für schwarz. Es wird aber auch deutlich, dass die Farbbeschreibung nicht nur von der meist hellen Matrix, sondern auch von Bänderungen, Mustern usw. abhängt, deren Munsell-Kennziffern deshalb ebenfalls notiert wurden.

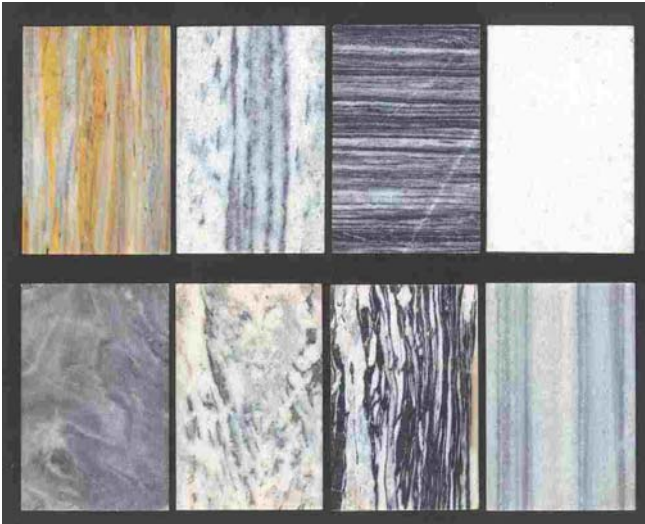


Abbildung 21: Buntmarmore aus dem Katalog von MIELSCH (1985). Zuordnung von links nach rechts: Bardiglio (1. Spalte), Greco scritto (2. Spalte), Prokonnesos (3. Spalte), Thasos (4. Spalte oben), Hymettos (4. Spalte unten). Die Zuordnungen zu Prokonnesos und Hymettos sind höchst zweifelhaft

Die in der 3. Spalte im Mielsch-Katalog als typisch prokonnesisch angesprochenen „Buntmarmore“ konnten von uns nirgendwo aufgefunden werden (im Begleittext wird die prokonnesische Herkunft zumindest der oberen Platte aufgrund der Korngrößen auch angezweifelt), diese ähneln viel mehr den in der 4. Spalte unten als hymettisch bezeichneten Marmoren, die – abgesehen von der im Katalog nicht erkennbaren Feinkörnigkeit – sowohl bei unseren Proben als auch nach Literaturangaben ein wesentlich unregelmäßigeres feinstreifiges Muster aufweisen.

Bei prokonnesischen Marmoren ist meist mit und ohne Lupe ein heterogenes Korngefüge feststellbar, in dem sich zahlreiche größere Kristalle (2-3 mm) aus einer feinkörnigeren Matrix hervorheben. Noch charakteristischer ist aber ihre in und darunter sichtbare parallele Bänderung (Abbildung 22 und Abbildung 23), die größtenteils auf feinverteilte opake Einschlüsse zurückgeht (mehr dazu in Kapitel 4.12 und 6.1).

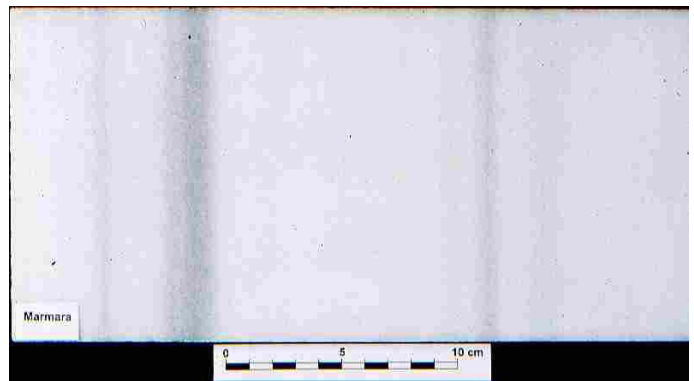


Abbildung 22: Typische parallele Bänderung in Marmoren von Marmara



Abbildung 23: Gebänderter Marmorblock auf Marmara



Abbildung 24: Bei Restaurierung am Telephosfries tritt dunkle Bänderung parallel zur Reliefoberfläche in Erscheinung

Diese Bänderung lässt sich auch an Platten des Telephosfrieses feststellen, allerdings verläuft sie dort fast immer parallel zur Reliefoberfläche (Abbildung 24) und ist damit der normalen Beobachtung entzogen. Erst die Restaurierung des Telephosfrieses bot überhaupt die Möglichkeit, dieses charakteristische Muster festzustellen.

Hier wird ein zentrales Problem berührt, das auch in dieser Arbeit die Ansprache äußerer Merkmale an den antiken Objekten erschwerte. Öfters sind die Oberflächen mit einer Schmutzschicht, Verkrustungen usw. bedeckt, die häufig aber erst im Museum und dessen Archiven entstanden sind. Deshalb wäre es sehr sinnvoll, wenn bereits bei der Freilegung der antiken Objekte oder gelegentlich ihrer Restaurierung sämtliche äußerlich erkennbaren Merkmale aufgenommen und dokumentiert würden. Gleiches gilt für Korngrößen u.ä., die sich fast immer an frischen Abplatzungen und Beschädigungen noch deutlich (z.B. mit einer Messlupe) erfassen lassen.

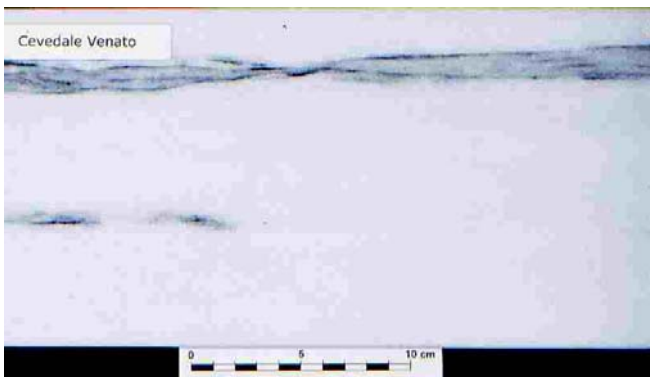


Abbildung 25: Bänderung in Marmor von Lasa

Wesentlich häufiger als z.B. prokonnesische Marmore zeigen die feinkörnigen Marmore von Carrara und Lasa (Abbildung 25) unregelmäßige dünne Bänder und Äderungen, oft mit gut erkennbaren Mineraleinschlüssen (besonders Quarz und Glimmer).

Die Marmore von Herakleia sind in ihrer großen Mehrzahl schon äußerlich erkennbar mittel- bis schwach grobkörnig bei vorwiegend homogenem Gefüge. Aber auch hier treten gelegentlich meist unregelmäßige Bänderungen auf, die sehr feinkörnig und auch dolomitreich sein können, während die weißen Partien das grobkörnigere Gefüge bewahren (Abbildung 26).



Abbildung 26: Feinkörnige dunkle, dolomitreiche Bänder in grobkörnigeren Marmoren von Herakleia

Weitere Fälle, bei denen äußere Merkmale eine Rolle für die Zuordnung spielten, werden in den entsprechenden Kapiteln behandelt.

4.4 Mikroskopische Untersuchungen und Merkmale

Von Marmoren antiker Objekte und Lagerstätten sind 219 Dünnschliffe angefertigt worden, daneben auch 36 polierte Anschliffe zur mikroskopischen Beurteilung der opaken Bestandteile (Fe-Oxide, Pyrit, Graphit usw.). Hinzu kamen die Dünnschliffe aus früheren Untersuchungen der Arbeitsgruppe Germann seit 1976. Erfasst wurden Korngröße, -form und -orientierung, Deformationserscheinungen, akzessorische Minerale etc.

Neben den üblichen Dünnschliffaufnahmen, die immer nur einen kleinen Ausschnitt der relativ grobkörnigen Marmore wiedergeben, hat sich die Anfertigung von 5-fach vergrößerten Schwarzweißaufnahmen der gesamten Dünnschliffoberfläche bei gekreuzten Polarisatoren und zusätzlich deren digitale Aufnahme als besonders geeignet erwiesen, um einen aussagekräftigen Überblick über wesentliche Gefügeeigenschaften zu erhalten. Ein Satz von knapp 400 mit einer Digitalkamera aufgenommenen und mit einem Maßstabbalken (2 mm) versehenen Dünnschliffaufnahmen bilden Teil der im Internet³⁶ verfügbaren Datenbank und wird auch in dieser Arbeit vorwiegend eingesetzt.

³⁶ www.lagerstaetten.tu-berlin.de

4.4.1 Bilddarstellungen

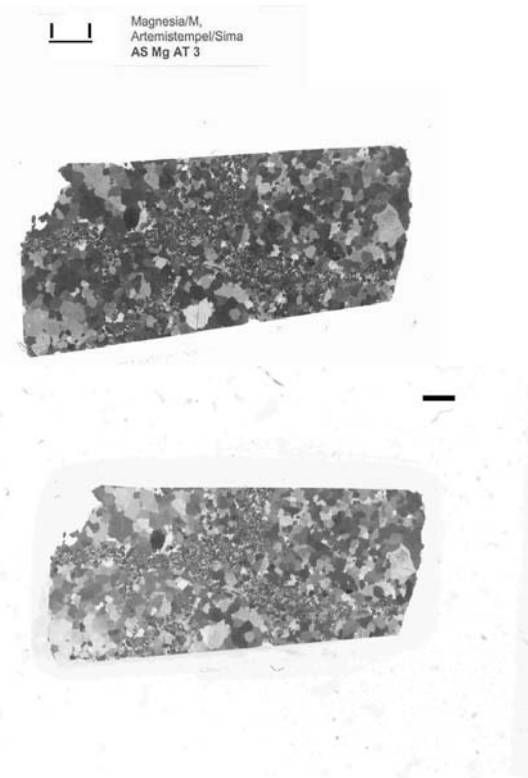


Abbildung 27 oben: eingescanntes Analogfoto (150dpi) eines Dünnschliffes des Artemistempels von Magnesia (ASMgAT3). Unten: Direkt digitalisierte Aufnahme des gleichen Dünnschliffes (300dpi); Bildgröße 21 bzw. 32 kB. Maßstabsbalken 2 mm

Für einige Zuordnungen haben sich qualitativ sehr hochwertige Schwarzweißfotos von Dünnschliffen bei gekreuzten Nicols in 5-facher Vergrößerung als am Besten geeignet erwiesen. Nachdem dieses Verfahren im Zuge der Einführung digitalisierter Aufnahmetechniken eingestellt worden ist, konnten nur noch digitalisierte Aufnahmen der Dünnschliffe bei gekreuzten Nicols im polarisierten Licht erstellt werden. Sie geben sowohl am Bildschirm wie auch im Ausdruck die Konturen nicht in der gleichen Deutlichkeit wieder wie bei den analogen Aufnahmen, was sich ansatzweise in Abbildung 27 erkennen lässt.

Trotz dieser Nachteile hat das digitale Aufnahmeverfahren auch unbestreitbare Vorzüge. Abgesehen davon, dass die Notwendigkeit eines nachträglichen Einscannens der Fotos entfällt, konnte eine große Zahl von Dünnschliffen zeitsparend aufgenommen werden, die in hoher Auflösung auch die bei gekreuzten Polarisatoren auftretenden Interferenzfarben wiedergeben (Abbildung 28 oben). Jedoch zeigte sich, dass die von der Schnittlage, Schliffdicke und mine-

ralischen Zusammensetzung abhängigen Interferenzfarben bei Betrachtung am Bildschirm keinen zusätzlichen Informationsgewinn und auch keine Vorteile für eine Weiterverarbeitung mit Auswertungssoftware brachten, da sie lediglich unterschiedliche Schnittlagen der hochdoppelbrechenden Karbonate wiedergeben.

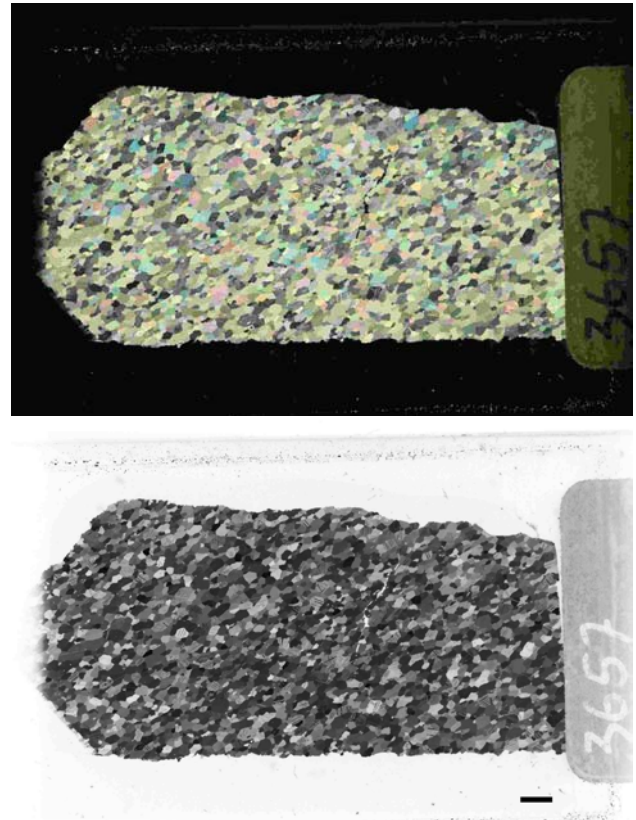


Abbildung 28: Digitalisierte Dünnschliffaufnahme (N+) in Farbe vor und nach Negativ- und Graustufenkonvertierung (Herakleia-Marmor Hk17), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Die aussagekräftigen Gefügemerkmale treten am Bildschirm nach Graustufenkonvertierung deutlicher zu Tage (Abbildung 28 unten). Die Bildverarbeitung mit automatisierter Graustufenkonvertierung, Einfügung des 2-mm-Maßstabsbalkens und Abspeicherung als jpg-Datei erfolgte mit der kostenlosen Software „IrfanView“ (<http://irfanview.tuwien.ac.at>).

4.4.2 Korngefüge

Das Korngefüge ist ein fundamentales Unterscheidungsmerkmal der untersuchten Marmore. In ihm bilden Korngrößen, Korngrößenunterschiede, Korngrenzen, Kornorientierungen, Einregelungen und Inhomogenitäten sowie intragranulare Gefügemerkmale wie Zwillingslamellen eine komplexe Einheit. Häufig für multivariate statistische Auswertungsverfahren

(Faktor-, Cluster-, und Diskriminanzanalyse) eingesetzte Daten der linearen und Flächenanalyse (MGS, AGS, heterogenes/homogenes Gefüge usw.) geben diese Komplexität nur unvollkommen wieder (s. Kapitel 3.2.2.4).

In dieser Arbeit wurden zur Ermittlung der maximalen Korngrößen (MGS) an den Dünnschliffaufnahmen die Durchmesser der 3 größten Körner eines Schliffes gemessen. Zur Ermittlung der mittleren Korngröße (AGS) wurden Strecken parallel und senkrecht zu einer eventuellen Kornlängung gemessen und durch die Anzahl der Körner geteilt. Der Quotient aus MGS und AGS ist zudem ein Indikator für die Heterogenität der Korngrößenverteilung. Er liegt bei homogenen Gefügen zwischen 1 und 2, bei heterogenen Gefügen wesentlich darüber. Boxplots zu den MGS, AGS, MGS/AGS und AGS1/AGS2-Quotienten verschiedener Lagerstättenmarmore finden sich in Kapitel 5.4.3 und 5.4.4.

Beim Vergleich mit direkt am Mikroskop vorgenommenen Messungen zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung. Nicht verwunderlich ist aber die Tatsache, dass anhand der Ausdrücke der Dünnschliffaufnahmen die ermittelten Korndurchmesser in der Regel etwas über denen anhand der Photographien ermittelten lagen. Diese durch das Verwischen von Konturen bedingte Art statistischer Kornvergrößerung hält sich jedoch in vertretbaren Grenzen.

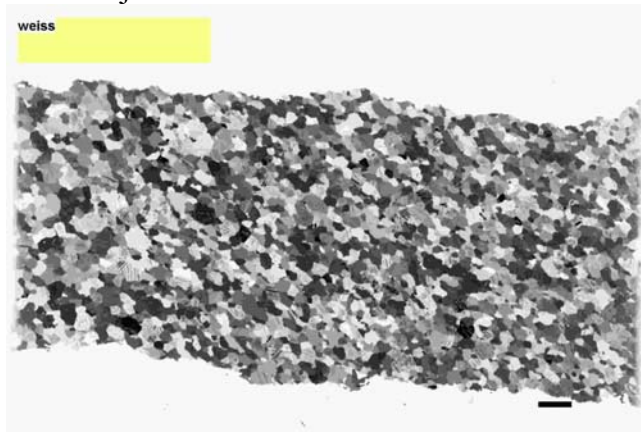


Abbildung 29: S&W-Bild von Burgass-Adasi-Marmor (BurgAd29_125) mit weißer Farbe der größeren Körner links und grauer Farbe der kleineren Körner rechts, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Oftmals ist ein Zusammenhang zwischen **Farbe und Korngröße** feststellbar. So gehören die größeren Körner auf der linken Seite der Abbildung 29 einem weißem Farbbereich an, während die kleineren Körner mit einer grauen

Färbung einhergehen, ohne dass unter dem Mikroskop ein höherer Anteil opaker Mineralien und Einschlüsse auszumachen war. Nichtsdestotrotz geht jedoch häufig ein grauer Farbton auch mit einem höherem Anteil an opaken Einschlüssen einher (z.B. SCHMID & FLAMMER 2002).

Ein charakteristisches Gefügemerkmal können auch Kornlängungen sein, die sich im Zusammenhang mit Schieferungen ausgebildet haben. Sie lassen sich häufig mit bloßem Auge am Gestein feststellen, traten aber in unserem Untersuchungsgebiet nie so deutlich zutage wie in Marmoren aus dem thessalischen Tembital (Abbildung 30 aus EILERT 1978 und GAST *et al.* 1979).

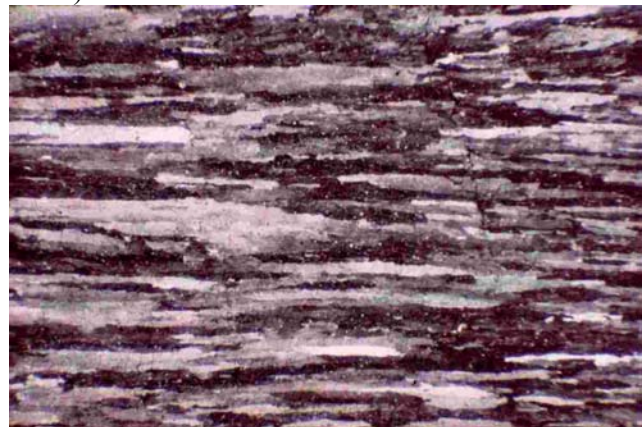


Abbildung 30: Extrem starke Kornlängung an Marmoren des thessalischen Tembi-Tals (Ga29.2), N+, kurze Kante 2,4 mm

Vor allem in duktilen akzessorienreichen Marmoren machen sich schon unter relativ geringen metamorphen Druckbedingungen – häufig die Sedimentation nachzeichnende – Einregelungen und Kornlängungen bemerkbar. Diese werden insbesondere bei höheren Temperaturen durch isometrische Calcitkornspaltung tendenziell wieder aufgehoben. Leider hat sich erst nach Abschluss der Hauptuntersuchungen herausgestellt, dass bei einigen Marmoren Gefügeuntersuchungen zusätzliche Informationen zur möglichen Unterscheidung relevanter Lagerstätten hätten liefern können (s. z.B. Kapitel 6.4.7 und 7.3.2).

Wie schon ausgeführt, erwies sich insbesondere der direkte Vergleich von Dünnschliffaufnahmen als überaus nützliches Unterscheidungsmittel. Abbildung 31 enthält Dünnschliffaufnahmen mit charakteristischen Gefügemerkmalen von Marmoren:

- a) sehr feinkörnig-homogen mit Einschlüssen (Carrara)
- b) feinkörnig heterogen mit Einregelung (Magnesia grau)
- c) mittelkörnig heterogen-bimodal (Prokonnesos)
- d) mittelkörnig het/hom (Herakleia3)
- e) mittelkörnig homogen (Herakleia)
- f) mittel-grobkörnig heterogen (Akkaya)
- g) mittelkörnig heterogen (Muğla)
- h) grobkörnig hom/het (Thasos-Aliki)
- i) sehr grobkörnig-heterogen (Naxos-Iria).

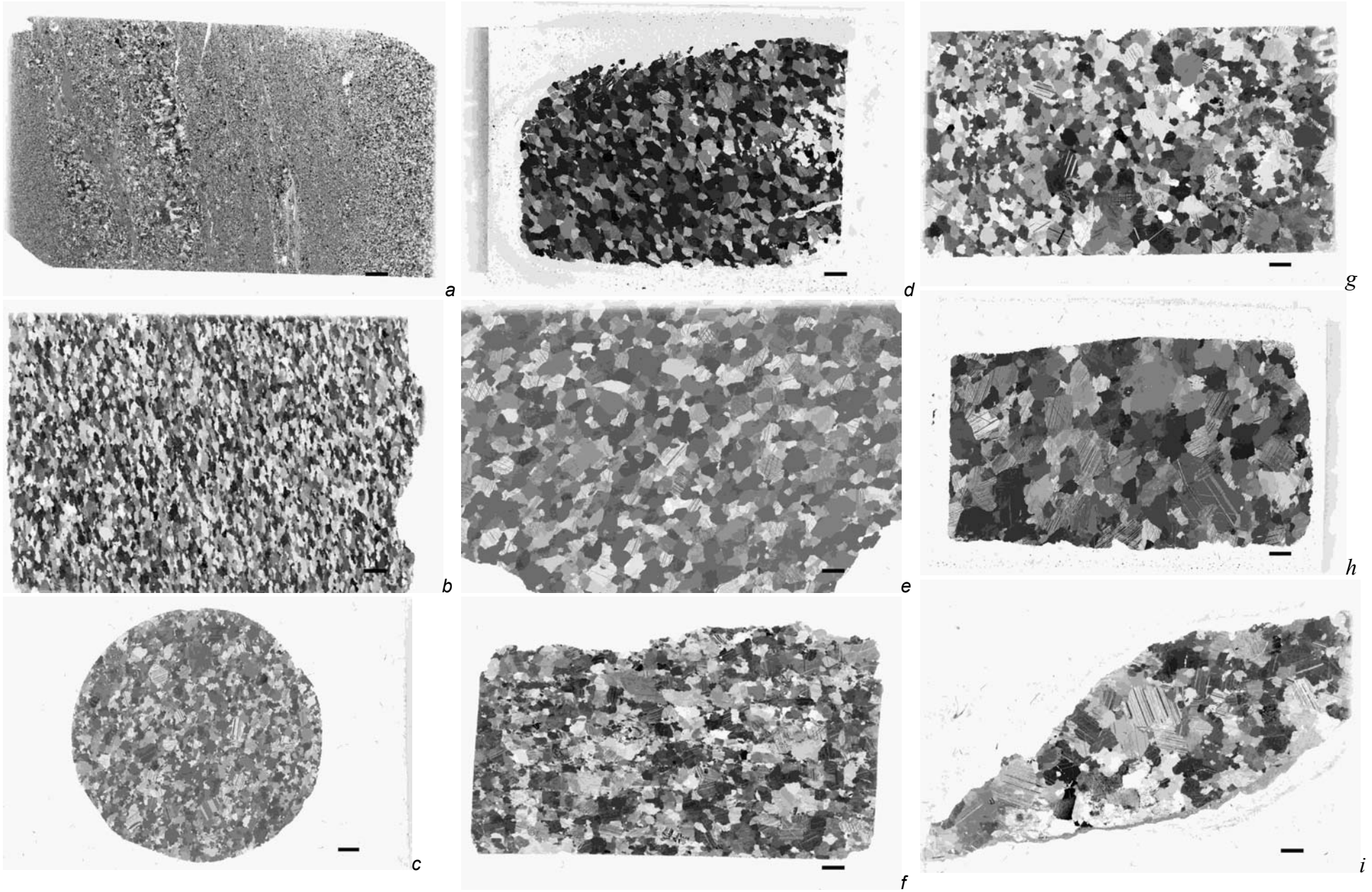
Die Herkunftsangaben der abgebildeten Proben in Klammern sollten allerdings nicht dazu führen, sie als unbedingt repräsentativ für die entsprechenden Lagerstätten zu betrachten. Im weiteren Verlauf der Untersuchung finden sich

viele Beispiele spezieller Gefügemerkmale und ihres Beitrags zur Herkunftsbestimmung.

Trotz der Vorteile der digitalen Gesamtdünnschliffaufnahmen wurde für die Feindiagnose spezieller Merkmale nicht auf die zusätzliche Untersuchung mit dem Mikroskop bei bis zu 400-facher Vergrößerung verzichtet.

Zusammengefasst werden in dieser Arbeit zwei Arten von Gesamtdünnschliffaufnahmen mit gekreuzten Nicols (N+) im polarisierten Licht verwendet: Digitalkameraaufnahmen mit automatisch eingefügtem 2-mm-Maßstabsbalken sowie eingescannte Photographien mit eingezeichnetem Maßstabsbalken 2 mm und 10-mm-Lineal (z.B. Abbildung 185). Gelegentlich kommen auch „normale“ Dünnschliffaufnahmen im polarisierten Licht bei gekreuzten Polarisatoren zum Einsatz, die jedoch durchweg nur einen Ausschnitt zeigen.

Abbildung 31: Dünnschliffaufnahmen von Marmoren mit verschiedenen Gefügeigenschaften (Erklärung vorige Seite), Maßstabsbalken 2 mm, N+



4.4.3 Bestimmung des Mineralbestands mit Dünnschliffen und Anschliffen

Die Dünnschliffe wurden unter dem Mikroskop auch auf ihre akzessorischen Mineralien hin untersucht. Diese kommen in den weißen Marmoren in der Regel nur in geringer Menge vor. Auftreten und Verteilungshäufigkeit sind jedoch sehr zufällig, und wie schon in vielen anderen Untersuchungen festgestellt, eignen sie sich nicht für eine pauschale Unterscheidung relevanter Marmorlagerstätten. Trotzdem wurden sie bei der Feindiagnose in den entsprechenden Kapiteln öfters herangezogen. Beispielsweise zeigen die prokonnesischen Marmore bei insgesamt geringen akzessorischen Mineralgehalten im Dünnschliff je cm² bei 100-facher Vergrößerung bis ca. 20 und mehr Körner Quarz und opake Mineralien (besonders Pyrit), während Hellglimmer nur sehr selten auftreten (allgemein lassen sich bei 40-facher Vergrößerung besonders die Quarzkörner kaum ausmachen). Demgegenüber sind in den ungebänderten Herakleia-Marmoren so gut wie keine akzessorischen Mineralien zu finden, während die untersuchten Carrara-Proben sehr hohe Quarz- und Glimmeranteile, jedoch fast keine opaken Mineralien aufweisen. Ein einfacheres pauschales Indiz können auch die Quarzpeaks sein, die bei der pulverdiffraktometrischen Erfas-

sung von Dolomit auftreten. So zeigen Lasa-Marmorproben unter dem Mikroskop beträchtliche Quarzanteile, die sich pulverdiffraktometrisch mit 0,7 Gew% (gegenüber 0-0,4 Gew% bei den meisten anderen Marmoren) bemerkbar machen.

Für einige spezielle Fragen wurden auch die 36 polierten Anschliffe zur genauen Identifizierung opaker Mineralien herangezogen.

4.4.3.1 Abhängigkeit Alizarin Rot von Schnittlage

Das bei feinkörnigen Karbonaten zur Unterscheidung dolomitischer und calcitischer Komponenten routinemäßig eingesetzte Anfärbeverfahren mit Alizarin Rot hat sich bei den hier untersuchten Marmoren als ungeeignet erwiesen (vgl. "Das Dolomit-Problem" in CRAMER 1998). Je nach Schnittlage wurden Calcitkörner angefärbt oder blieben farblos, was im letzteren Fall auf Dolomit hingewiesen hätte, und das auch bei Proben, in denen sowohl pulverdiffraktometrisch als auch geochemisch (sehr niedriger Mg-Gehalt) kein Dolomit nachweisbar ist. Die nachträgliche Anfärbung einiger Dünnschliffe bestätigte diese Beobachtung und führte durch Säureeinwirkung lediglich zu einer Verwischung der Korngrenzen und der Gefügekonturen insgesamt (s. Abbildung 99 ff.).

4.5 Bestimmung von Calcit, Dolomit und Quarz mittels Pulverdiffraktometrie

Insgesamt 182 Proben wurden röntgendiffraktometrisch untersucht (Philips PW1710, 50 kV, 30 mA, Cu-LFE-Röntgenröhre, Graphitmonochromator, automatischer Divergenzschlitz, 3-80°, Schrittweite 0,02° alle 2,5 s.).

Die Intensitäten der Calcit-, Dolomit- und Quarz-Hauptpeaks wurden herangezogen, um diese Phasen ohne allzu großen Genauigkeitsanspruch halbwegs quantitativ zu erfassen. Beispielsweise wird Dolomit in Gew% nach Messung der Peakhöhen mittels der Formel

$$\text{Dol(Gew\%)} = \frac{\text{Dol-peak} * 1,53}{\text{Qz-peak} * 1 + \text{Cc-peak} * 1,65 + \text{Dol-peak} * 1,53}$$

berechnet (s. Tabelle im Anhang 10.14).

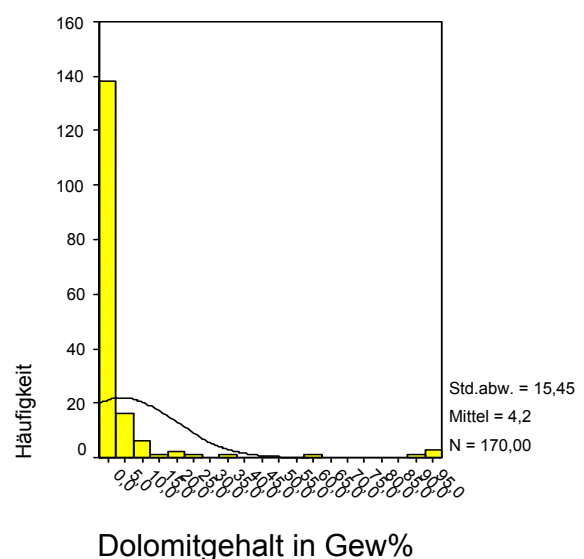
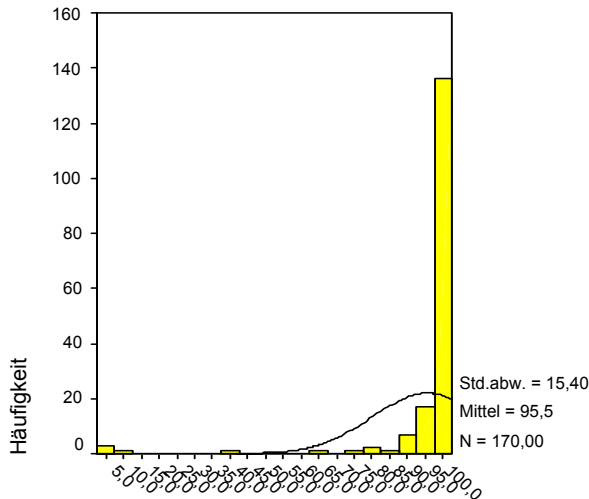


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung von Dolomit mit Normalverteilungskurve bei den hellen Marmoren, röntgendiffraktometrisch bestimmt

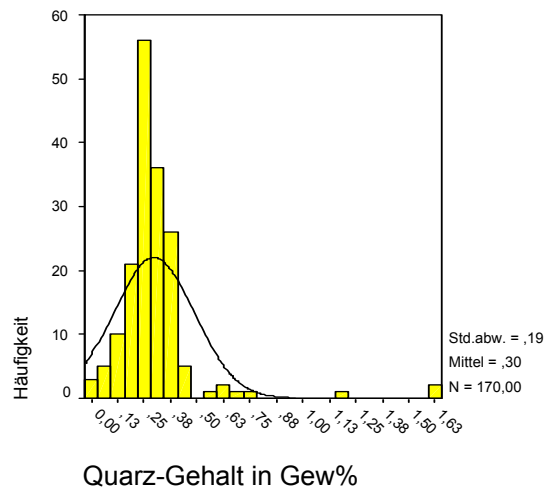


Calcitgehalt in Gew%

Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung von Calcit mit Normalverteilungskurve bei weißen und weißgrauen Marmoren, röntgendiffraktometrisch bestimmt

Komplementär zu Dolomit (Abbildung 32) verläuft das Häufigkeitsdiagramm von Calcit (Abbildung 33). Die starke Abweichung von der Normalverteilung drückt die Tatsache aus, dass die meisten der gemessenen weißen bis weißgrauen Marmore fast nur aus Calcit bestehen. Die nassanalytisch ermittelten Mg-Gehalte (Kapitel 4.6) zeigen eine gute Korrelation ($Mg = 0,38 + 0,12 \cdot \text{Dolomit}$, $R^2 = 0,94$) mit den röntgendiffraktometrisch bestimmten Dolomitanteilen bei relativ gleichmäßig verteilten Abweichungen nach oben und unten (Abbildung 35). In der Regel treten Dolomitpeaks erst bei Mg-Gehalten $>0,33$ Gew% auf (Abbildung 36). Bei den 61 Proben mit Dolomitpeaks unterhalb 0,1 Gew% wurden lediglich in 16 Proben Mg-Gehalte von 0,33 - 0,56 Gew% gemessen, bei den 25 Proben ohne jeglichen Dolomitpeak liegen 8 Mg-Meßwerte zwischen 0,33 und 0,42 Gew%, alle anderen darunter. Hiervon sind fast ausschließlich prokonnesische Marmore betroffen. Umgekehrt traten in 6 von 56 Fällen Dolomitpeaks über 0,1 Gew% auf, obwohl die Mg-Gehalte 0,33 Gew% nicht überschritten. Neben möglichen Messfehlern drückt sich darin die Tatsache aus, dass die Dolomitanteile im Marmor sehr ungleichmäßig verteilt sein können. Dies führt bei nicht hinreichender Probenhomogenisierung zu starken Schwankungen, insbesondere wenn die Entnahme des Probenmaterials für beide Messverfahren nicht gleichzeitig erfolgte. Die Abweichungen können aber auch

auf eine gesteinsbildungsspezifisch unterschiedliche Aufnahmefähigkeit von Mg in das Calcitgitter hinweisen: Die größten positiven Abweichungen von der Regressionsgeraden mit einem höheren Mg/Dolomit-Verhältnis weisen Marmore auf, die der antiken Lagerstätte von Magnesia am Mäander zuzuordnen sind. Ohne diese Proben verbessert sich die Regressionsgleichung auf $Mg = 0,32 + 0,12 \cdot \text{Dolomit}$, $R^2 = 0,98$. Diese Häufung mag Zufall sein, könnte aber auch darauf hinweisen, dass das Calcitgitter dieser dolomitreichen Lagerstätte mehr Mg aufnahm, was wiederum ein Indiz für die Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichts der Lagerstättenmarmore von Magnesia bei höheren Bildungstemperaturen wäre (vgl. GOLDSMITH & NEWTON (1969), ANOVITZ & ESSENE (1987) und Abbildung 8 auf S. 21). Jedoch ließ sich keine nennenswerte Verschiebung des (104)-Peaks von Calcit als Folge des Einbaus kleinerer Mg-Kationen und einer Reduzierung des Netzgitterebenen feststellen. Bemerkenswerterweise fanden sich vor allem bei prokonnesischen Marmoren (s. dort) in den dunkleren Bänderungen oft höhere Dolomitgehalte, ohne dass dies makroskopisch anhand von Korngrößenunterschieden erkennbar war. Die Quarzpeaks (Abbildung 34) weisen weitgehend eine Normalverteilung bei sehr niedrigen Gehalten auf.



Quarz-Gehalt in Gew%

Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung von Quarz mit Normalverteilungskurve bei den hellen Marmoren, röntgendiffraktometrisch bestimmt

Da die XRD-Hauptreflexe von Quarz und Kohlenstoff (Graphit) praktisch an gleicher Stelle liegen und die anderen Peaks von den vorherrschenden Karbonatreflexen überlagert werden, lassen sich beide Phasen pulverdiffrakto-

metrisch nicht sicher unterscheiden. In Dünnschliffen ist jedoch trotz häufiger Anwesenheit opaker Einschlüsse Quarz das mengenmäßig vorherrschende akzessorische Mineral. Die berechneten Quarzanteile reichen – bei einer starken Häufung zwischen 0,2 und 0,3 Gew% – von 0,0 Gew% (bei einigen Dolomitmarmoren) bis 1,6 Gew% (dunklere Marmorpartie des Waffenreliefs der Athenahallen in Pergamon, die auch unter dem Mikroskop hohe Gehalte an grobkörnigem (MGS 0,75 mm) Quarzdetritus

und opaken Mineralien aufweist). Auch in weiteren Fällen zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem mikroskopischen Befund, so dass aus den XRD-Daten bzw. den mikroskopisch bestimmbaren Modalgehalten der **säureunlösliche Anteil** abgeschätzt werden kann. Dessen Bestimmung in weißen Marmoren durch Säurelösung würde größere Probenmengen verlangen (z.B. für 0,2 g bei 0,2 Gew% 100 g Marmor), was bei Museumsobjekten nur in seltensten Fällen vertretbar ist.

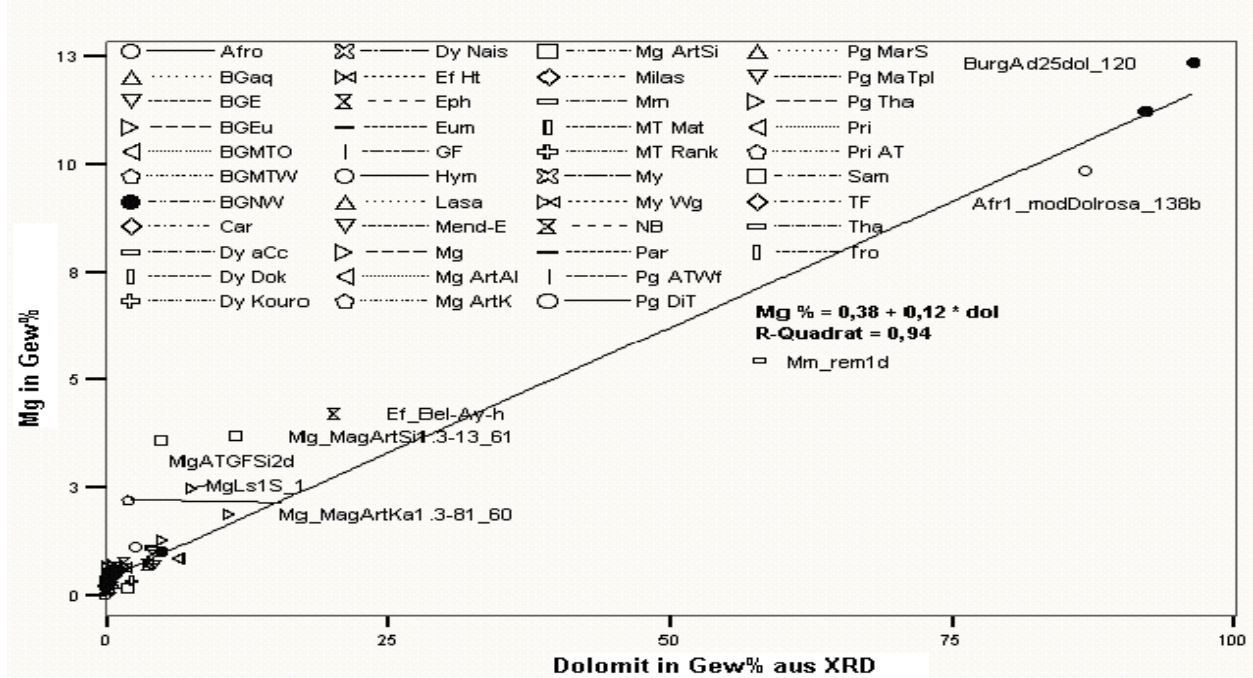


Abbildung 35: Korrelation zwischen aus röntgendiffraktometrisch ermittelten Dolomitgehalten und Magnesiumgehalten aus ICP-OES. Die größten Abweichungen von der Regressionsgeraden ergeben sich bei Marmoren mit sehr unregelmäßig verteilten Dolomitgehalten.

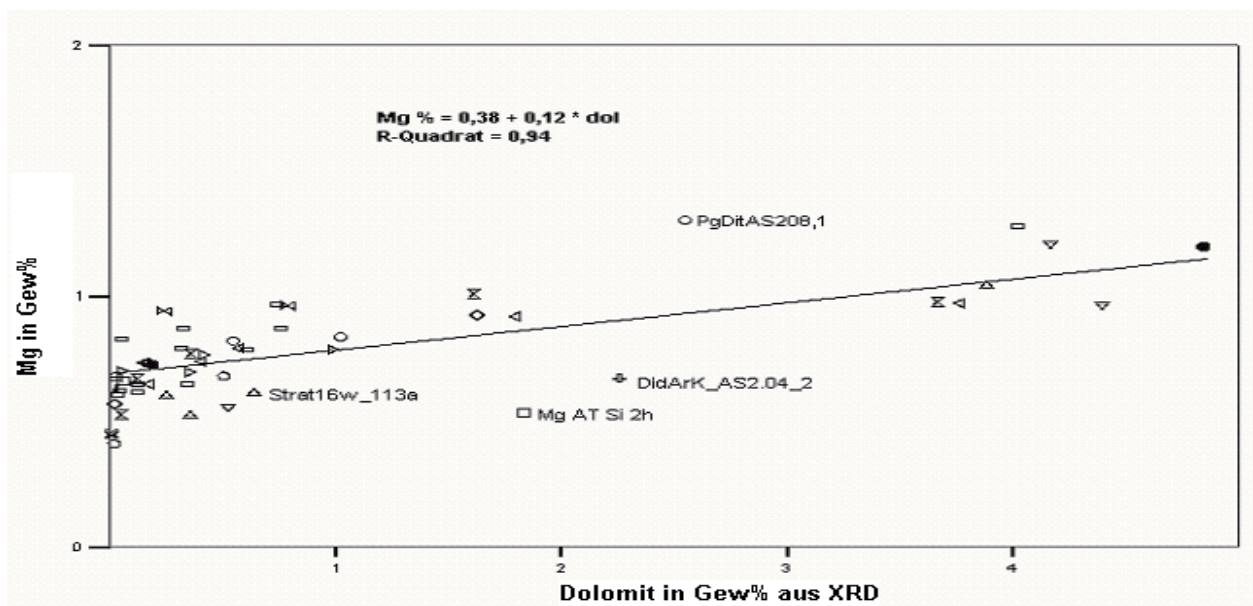


Abbildung 36: Ausschnitt aus vorhergehender Abbildung zur Korrelation zwischen röntgendiffraktometrisch ermittelten Dolomit- und nassanalytisch ermittelten Magnesiumgehalten

4.6 Geochemische Untersuchungen mittels ICP-MS und ICP-OES

Nach einigen Versuchen wurde auf RFA-Untersuchungen verzichtet, da die weißen Marmore neben Calcium und Magnesium zumeist nur unter der Nachweisgrenze liegende Gehalte an Neben- und Spurenelementen enthalten und zugleich der Nugget-Effekt zufällig vorhandener akzessorischer Mineralien zu sehr uneinheitlichen Aussagen führt. Lediglich die karbonatgittergebundenen Sr-Gehalte waren gut detektierbar und stimmten mit den nassanalytisch ermittelten Werten überein. Zudem ist der Materialverbrauch vergleichsweise hoch. Auch AAS-Untersuchungen beanspruchten für Messungen im ppm-Bereich Probenmengen, die bei den Museumsobjekten nicht vertretbar erscheinen. Wo sinnvoll, wurden frühere Ergebnisse von RFA-, AAS-, Graphitrohrföfen-AAS und ICP-AES-Messungen einbezogen. Dies gilt einmal für die im Zusammenhang mit der Untersuchung des Telephosfrieses erhaltenen Ergebnisse (CRAMER 1998), und zum anderen für zumeist über AAS ermittelte Messwerte von Marmoren des westlichen Menderes-Massivs und der Kykladen (GERMANN 1981; GERMANN & KNOLL 1987; GERMANN *et al.* 1988).

Als effizientestes nassanalytisches Verfahren erwies sich die kombinierte Verwendung von ICP-MS und ICP-OES aus einer Probenlösung (Messwerte s. Tabelle im Anhang 10.14). Mittels **ICP-MS** wurden am Geoforschungszentrum Potsdam insbesondere die Seltenerdelemente (**SEE** oder **REE**) einschließlich **Y** bestimmt. Ein Vorteil der ICP-MS ist, dass die SEE ohne Abtrennung und Voranreicherung direkt aus den Aufschlüssen gemessen werden können (s. z.B. LONGERICH *et al.* 1987). Zusätzlich wurden **Sr**, **Ba**, Rb, Zr, Cs, Hf, Pb, Th, U und teilweise Ca erfasst, wobei jedoch nur die Sr- und Ba-Messwerte für die Auswertung Verwendung fanden. Für die Probenlösung wurden 0,1 – 0,2 g Probenmaterial in 50 ml 0.5N HNO₃ aufgelöst und filtriert³⁷. Aufgrund

störender Einflüsse der Ca-reichen Matrix auf die Messapparatur war eine weitere Verdünnung der Probenlösung auf 2500 bzw. 5000 notwendig. Im Anhang (10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8) befinden sich Auszüge zu Bestimmungsgrenzen (BG, µg/g), Blindwert (BW, µg/g), Reproduzierbarkeit der Messungen, Messwerte von Standards (Carrara-Marmor (GFZ) und Limestone (IAG)) sowie Driftkontrolle von Proben und GSJ-Dolomit-Standard bei Verdünnungsfaktor 1000 und 5000. Bei den SEE beträgt die relative Standardabweichung zwischen 0,4 und 7%, bei niedrigen Gehalten nahe der Nachweisgrenze auch bis 17%. Für Sr sind die Standardabweichungen wesentlich geringer, für die meisten anderen Elemente oft wesentlich höher - ein Grund, warum sie in die Auswertung nicht einbezogen wurden.

Da immer wieder neues Probenmaterial hinzukam und sich im Laufe der Zeit die Empfindlichkeit der ICP-MS-Messapparatur verschlechterte, konnten bei einigen sehr SEE-armen Marmoren in den letzten Messperioden die niedrigsten Gehalte nicht mehr hinreichend deutlich detektiert werden. Ansonsten wiesen die Werte gleicher Proben jedoch bei Wiederholungsmessungen (einschließlich vom Telephosfries 1995 und jetzt, s. Abbildung 41) eine sehr gute Übereinstimmung auf.

Aussagekräftiger als die absoluten Elementgehalte erwiesen sich ihre Verhältnisse, so Y/Ho und die Summe der SEE zu Y ($\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$); ebenso die Verteilungsmuster, die sich nach Normierung auf den PAAS-Standard³⁸ ergeben. Dies wird weiter unten detailliert diskutiert.

Aus den ICP-MS-Restlösungen (Verdünnungsfaktor 250 und 500) wurden am Alfred-Wegener-Institut Potsdam mittels **ICP-OES** (*Perkin Elmer Optima 3000 xl*) weitere Elementgehalte (**Mg**, **Fe**, **Mn**, **Sr**, **Ba**, Na, K, Zn, P und teilweise Ca) bestimmt. Lediglich die ersten 5 Elemente fanden regelmäßig für eine

verdünnt (Gesamtverdünnungsfaktor VF=2500) und mit Ru/Re als interne Standards versetzt (pers. Mitteilung Peter Dulski).

³⁸ PAAS (Post-Archean Australian Shale), Werte aus MCLENNAN (1989).

³⁷ In jeder Aufschlußserie wurden 13 Proben und eine Referenzprobe aufgeschlossen sowie zwei Blindaufschlüsse (BW und Merck) durchgeführt. 0,2 g Probe wurde mit 10 ml Salpetersäure (subboiled, 6 Mol/l) im Schüttelwasserbad bei 75 °C innerhalb von zwei Stunden aufgeschlossen. Die im allgemeinen klare Lösung wurde filtriert, in einen 50 ml Meßkolben (Glas) überführt und mit Reinstwasser (Milli-Q, 18 MO, Millipore) aufgefüllt. Für die Messung wurden die Lösungen mit 0.5 Mol/l HNO₃ 1:10

Auswertung Verwendung. Ca und Mg ergaben bei den reinen Marmor- und Calcitproben rechnerisch meist knapp 100 Gew% Karbonat (s. Kapitel 10.9, dort auch Standard-, Blindwert- und eine Auswahl von Probenmessungen; in 10.10 Kontrollmessung certif. Wasser-Standard SRM 1640 in Ca-Matrix-Lsg.). Strontium und Barium wurden sowohl mittels ICP-MS als auch OES aus der gleichen Lösung erfasst.

Bei Sr weichen die Ergebnisse beider Messverfahren bei 250-facher Verdünnung im Mittel um $9 \pm 7\%$ ab (zwischen 0,41 und 25%), wobei ICP-OES die höchsten positiven Abweichungen bei Sr-Gehalten über 150 ppm und die höchsten negativen Abweichungen bei niedrigen Gehalten zwischen 42 und 69 ppm zeigt (s. Vergleich in 10.11 Anhang). Bei 500-facher Verdünnung liegen fast alle ICP-OES-Messwerte um durchschnittlich 10% niedriger. Zwar lagen von den wesentlich geringeren Bariumgehalten (0,36-5,16 ppm) nur 85 über der ICP-OES-Nachweisgrenze von 1,5 ppm, aber bei diesen fallen die Abweichungen mit $2 \pm 6\%$ noch geringer aus, bei lediglich 2 von 40 Messwerten überschreiten sie 10%.

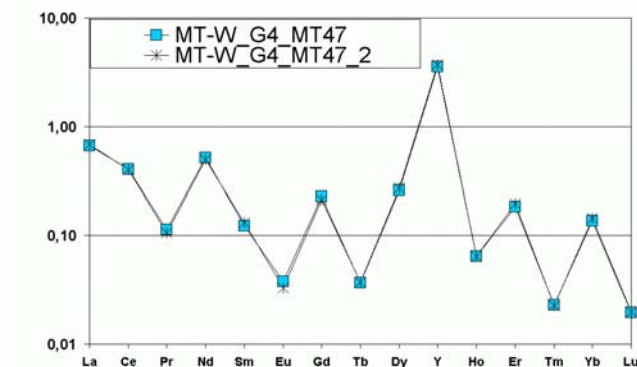


Abbildung 37: Praktisch identische SEE-Gehalte von 2 Fragmenten aus den Milet-West-Brüchen

	Σ SEE ppm	Fe ppm	Mg Gew%	Mn ppm	Sr ppm ICPOES	Sr ppm ICPMS	Zn ppm
MT47/1	2,82	53,0	0,22	6,12	121	136	<5
MT47/2	2,82	40,2	0,15	3,56	127	140	<2,5

In der Praxis zeigte sich eine gute Übereinstimmung. So sind bei 2 unterschiedlichen Proben eines Handstücks der Milet-West-Brüche trotz doppelter Verdünnung der 2. Messprobe die SEE-Werte fast identisch (Abbildung 37), die Abweichungen der mit ICP-OES ermittelten Elemente bewegen sich im Rahmen der natürlichen Variationsbreite karbonatgittergebundener Spurenelemente.

Angesichts der natürlichen Inhomogenitäten innerhalb einer Lagerstätte und wesentlich größerer Abweichungen bei anderen Analyseverfahren bestätigen die Messdaten die Brauchbarkeit dieser materialschonenden Methode. Grundsätzlich wurden zur Marmorcharakterisierung und Lagerstättenabgrenzung, für die es in der Tat auf die Spannweite der Elementgehalte und nicht auf fiktive Mittelwerte ankommt, die Messwerte beider Verfahren herangezogen.

Neben dem geringen Materialverbrauch besitzen diese auf Nassaufschlüssen beruhenden Meßmethoden den Vorteil, dass hauptsächlich die in der säurelöslichen Calcit/Dolomit-Matrix der Marmore eingebauten Elementgehalte analytisch erfasst werden, weil akzessorische Mineralien nur in geringem Ausmaß angelöst werden. Letztere sind in den Marmoren erratisch verteilt und können bei Messungen des Gesamtchemismus wie mittels RFA oder der wesentlich sensitiveren INAA zufallsbedingt stark erhöhte Elementgehalte anzeigen (s. Diskussion in Kapiteln 3.3.3 und 3.3.4).

Für die gegenteilige Behauptung, dass auch akzessorische Mineralien aufgelöst und die Messergebnisse wesentlich beeinflussen würden, gibt es keinen Beleg. Zum einen ist es bei den geringen Probenmengen der weißen Marmore unwahrscheinlich, dass akzessorische Mineralien überhaupt erfasst werden. Zweitens werden am AWI normalerweise auch die hellen Karbonate einem intensiven Säureaufschluss unterworfen, weil dort gerade der Gesamtgesteinchemismus interessiert, was bei unseren Proben aber unterblieb. Drittens zeigte sich z.B. nur selten eine schwache positive Korrelation zwischen den SEE, Fe, P, U, Zr, Th und anderen Elementen, die bei der Auflösung akzessorischer Mineralien (Pyrit, Apatit, Glimmer usw.) gemeinsam gehäuft auftreten müssten. Sehr viel enger ist der Zusammenhang zwischen den Elementen, die üblicherweise in das Karbonatgitter eingebaut werden. Da Ca und Sr ähnliche Ionenradien wie die SEE haben, können sie sich gegenseitig substituieren, weshalb der Einbau der SEE in das Karbonatgitter nicht nur bei Karbonatiten anzunehmen ist.

Deshalb ist auch der messapparate-technisch begründete Verzicht auf die Verwendung von Monochloressigsäure, die nur die Karbonatphasen aufzulösen vermag, unproblematisch. Bei früheren Untersuchungen an weißen, in Essig-

säure aufgelösten Marmoren (GREEN *et al.* 2002) hatte sich bereits gezeigt, dass im Filtrat keine zusätzlichen akzessorischen Anteile auftraten.

Für die Erfassung des säureunlöslichen Anteils ist aufgrund des hohen Probenbedarfs besonders bei den Museumsobjekten eine Abschätzung auf der Basis der mikroskopisch erfassbaren akzessorischen Modalanteile und Quarz-XRD-Gehalte (s. dort) angebracht.

PN	Fundort	Mg	Fe	Sr	Mn	Fe/Sr	Fe/Mn
		Gew%	ppm	ppm	ppm		
Nx21,1 OES	Naxos, Apollon	1,16	64,6	153	48	0,42	1,34
21,1 AAS		0,94	40	115	40	0,35	1,00
Nx21,11 OES	Naxos, Kini- daros	0,26	35	117	9,2	0,3	3,8
21,11 AAS		0,29	50	90	15	0,56	3,33
PaLy38T, OES	Paros Lychni- tes	0,17	10,7	212	5,19	0,05	2,06
38TUM AAS		0,2	30	180	18	0,17	1,67

Tabelle 10: Messwerte AAS und ICP-OES

In Tabelle 10 sind einige Messwerte von Probenmaterial gegenübergestellt, das früher nach HCl-Aufschluss mit AAS (GERMANN *et al.* 1988) und jetzt nach HNO₃-Aufschluß mit ICP-OES analysiert wurde. Generell zeigen sich hier wie auch bei anderen Proben geringe, durch natürliche Schwankungen im Gestein erklärable Abweichungen. Jedoch sind die jetzigen Sr-Gehalte generell leicht erhöht, und die niedrigeren Fe- und Mn-Gehalte teilweise erniedrigt. Es ist schwer abzuschätzen, welche Werte „wahrer“ bzw. richtiger sind und wie hoch der Einfluss der unterschiedlichen Aufschlussverfahren ist. Aber zumindest ist die Vergleichbarkeit eingeschränkt. Da auch bei anderen Proben ICP-OES gelegentlich niedrigere Fe- und Mn-Werte anzeigt (letztere oft verdünnungsabhängig im Bereich der Nachweisgrenze von 2,5 bzw. 5 ppm), sollte bei zukünftigen Messungen die Reihenfolge umgekehrt werden: zunächst besonders für die Messung von Mn und Fe mittels ICP-OES bei geringerer Verdünnung der Probenlösung, und anschließend bei höherer Verdünnung mittels ICP-MS.

Insgesamt weisen die chemischen Elemente trotz häufiger Überlappungen ein beträchtliches Diskriminierungspotential für die Provenienzanalyse auf. In Kapitel 5.1 werden hauptsächlich anhand von Boxplots die lagerstättenspezi-

fischen geochemischen Signaturen vergleichend dargestellt.

4.6.1 Seltenerdelemente – Verteilungsmuster und Relevanz für die Marmorcharakterisierung

Zu den Seltenerdelementen zählen alle Elemente der IIIA-Reihe des Periodensystems außer Sc, also die Lanthaniden von Lanthan bis Lutetium sowie Yttrium. Sie und ihre Verteilungsmuster wurden in den letzten Jahren intensiv untersucht (vgl. LIPIN & MCKAY 1989; MCLENNAN 1989; DE BAAR *et al.* 1991; JONES *et al.* 1996). Ihr chemisches Verhalten ist untereinander ähnlich, aber einige Besonderheiten erlauben Rückschlüsse insbesondere auf die Bildungsbedingungen der sie enthaltenden Ausgangsgesteine. Die SEE sind sehr elektrophil und bilden deshalb eine Vielzahl an ionaren Verbindungen und Komplexen mit fast allen Mineralgruppen (Borate, Karbonate, Oxide, Silikate, Phosphate usw.), deren 200 Mineralnamen oft höchst exotisch klingen. Doch kommen sie gar nicht so selten vor, wie ihr Name vermuten lässt: sieben von ihnen haben in der kontinentalen Kruste ähnliche Gehalte wie Wolfram, Arsen, Zinn oder Brom, vier (La, Ce, Nd, Y) gar in der Größenordnung von Kupfer, Kobalt, Rubidium und Zink (HENDERSON 1996). Ihre nur gelegentliche Anreicherung in recht wenigen Lagerstätten macht sie somit als praktisch überall vorkommende Tracer einsetzbar. Aufgrund ihres Ionenradius können sie leicht Ca und Sr substituieren (s. Tabelle 1). Der Ladungsausgleich der meist dreiwertigen Kationen erfolgt dabei durch einwertige Anionen wie F⁻ oder OH⁻. Sie sind z.B. in magmatisch entstandenen Karbonatiten oft stark angereichert. Ebenso kann es in Karst-Bauxit-Lagerstätten zu in-situ-Anreicherungen kommen (MAKSIMOVIC & PANTO 1996), wenn das Karbonat in Lösung abgeführt wurde (vgl. demgegenüber die fast unveränderten Werte in einem untersuchten Marmara-Marmorfragment und einem zugehörigen Karstkalksinter in Tabelle 24 und dem Diagramm auf S. 122). Zwar weisen die SEE bei in alkalinen Gesteinen koexistierenden primären Calciten und Apatiten in den letzteren eine fast 10-fach stärkere Konzentration auf (MORTEANI & PREINFALK 1996). Das bedeutet aber nicht, dass einige eventuell in Marmor vorhandenen Apatitkristalle sämtliche

SEE-Gehalte auf sich gezogen hätten. Das Verhalten der SEE in aquatischen Systemen ist komplex, trotzdem kann angenommen werden, dass der größte Teil der SEE direkt in das Calcitgitter der Marmore eingebaut wird – nicht ohne aufschlussreiche Fraktionierungsprozesse durchlaufen zu haben.

Allgemein erfahren die SEE in Metamorphiten gegenüber dem Ausgangsgestein nur geringe und zugleich charakteristische Änderungen.

	C1	PAAS	ES	NASC
La	0,235	38,20	41,1	32
Ce	0,603	79,60	81,3	73
Pr	0,089	8,83	10,4	7,9
Nd	0,452	33,90	40,1	33
Sm	0,147	5,550	7,3	5,7
Eu	0,056	1,080	1,52	1,24
Gd	0,197	4,660	6,03	5,2
Tb	0,036	0,774	1,05	0,85
Dy	0,243	4,680	6	5,8
Y	1,56	27,0		
Ho	0,056	0,991	1,2	1,04
Er	0,159	2,850	3,55	3,4
Tm	0,024	0,405	0,56	0,5
Yb	0,163	2,820	3,29	3,1
Lu	0,024	0,433	0,58	0,48

Tabelle 11: Gehalte verschiedener für die Normierung der SEE eingesetzter Standards (Zusammenstellung von P. Dulski). Erläuterung der Abkürzungen im Text

Aufgrund der stellaren Predominanz von Elementen mit gerader Ordnungszahl (Regel von Oddo-Harkins) verläuft die Verteilungskurve der SEE gezackt³⁹ (Abbildung 38 oben). Für gewöhnlich werden die SEE normiert, meist auf die Zusammensetzung des **C1-Chondriten** (ANDERS & GREVESSE 1989; DE BAAR *et al.* 1991). Deren SEE-Gehalte entsprechen ungefähr denen solarer Materie und damit dem Gesamtchemismus der Erde.

Von den weiteren Normierungsstandards ist der auf **PAAS-Tonsteine** (*Post-Archean Australian Shale*)⁴⁰ besonders anschaulich, weil diese der durchschnittlichen Zusammensetzung der tonigen Sedimente in der oberen kontinentalen Kruste entsprechen. Hier sind die SEE gegen-

³⁹ Da das kurzlebige radioaktive Promethium so gut wie nie gemessen werden kann, wird es meist nicht dargestellt, weshalb zwischen Neodymium und Samarium ein solcher Knick fehlt.

⁴⁰ PAAS aus McLennan (1989).

über dem C1-Chondriten um den Faktor 10-100 angereichert (beachte die logarithmische Skalierung in Abbildung 38!). Insbesondere zeigen sich, häufig noch deutlicher als in Abbildung 38 unten erkennbar, Verarmungen des Cer-Gehalts, die für verschiedene Marmore besonders charakteristische **negative Cer-Anomalie**. Dieses hier häufig verwendete Verhältnis wurde unter Einbeziehung der Nachbarermente nach der Formel berechnet:

$$Cer_{neg} = \frac{Ce}{79,6} * \frac{2}{(La/38,2 + Pr/8,83)}$$

mit Ce, La, Pr: Gehalte (ppm)

Zahlen: Gehalte in PAAS (ppm)

Dies bedeutet, dass eine ausgeprägte negative Cer-Anomalie mit einem kleineren Wert (0,1-0,5) dargestellt wird, der sich bei höheren Cer-Gehalten 1 nähert oder gar überschreitet.

Bei Normierung auf C1-Chondrit zeigt sich zwar eine größere Spreizung der Werte bei höheren Cer-Gehalten (0,1-1,95 statt 0,1-1,4), die aber auch zu einer breiteren Streuung innerhalb der Lagerstätten führen (so für Marmore von Euromos am Bafa-See zwischen 0,98 und 1,76 statt 0,87-1,07).

Bei zu niedrigen Pr-Gehalten kann es notwendig sein, diese zusammen mit der 2 im Zähler wegzulassen. Der Quotient aus beiden Berechnungsverfahren variiert bei den untersuchten Marmoren zwischen 0,8 und 1,6, jedoch mit einer starken Häufung um 1.

Schließlich lässt sich die relative Verarmung von Ce zu La auch einfach durch den Quotienten La/Ce ausdrücken, mit 0,36 bei den geringsten und 5 bei den am stärksten ausgeprägten negativen Cer-Anomalien. Dies kann aber ebenfalls zu einer stärkeren Streuung um den Median innerhalb einer Lagerstätte führen (z.B. beim Großen Fries zwischen 1,14-2,63 gegenüber 0,21-0,52) und damit auch zu einer größeren Überlappung verschiedener relevanter Lagerstätten. Da La/Ce aber der im unnormierten Diagramm erkennbaren Steigung der Verbindungslinie zwischen La und Ce entspricht (weniger Cer >1, mehr Cer <1), wird dieser Quotient hier ebenfalls häufig benutzt.

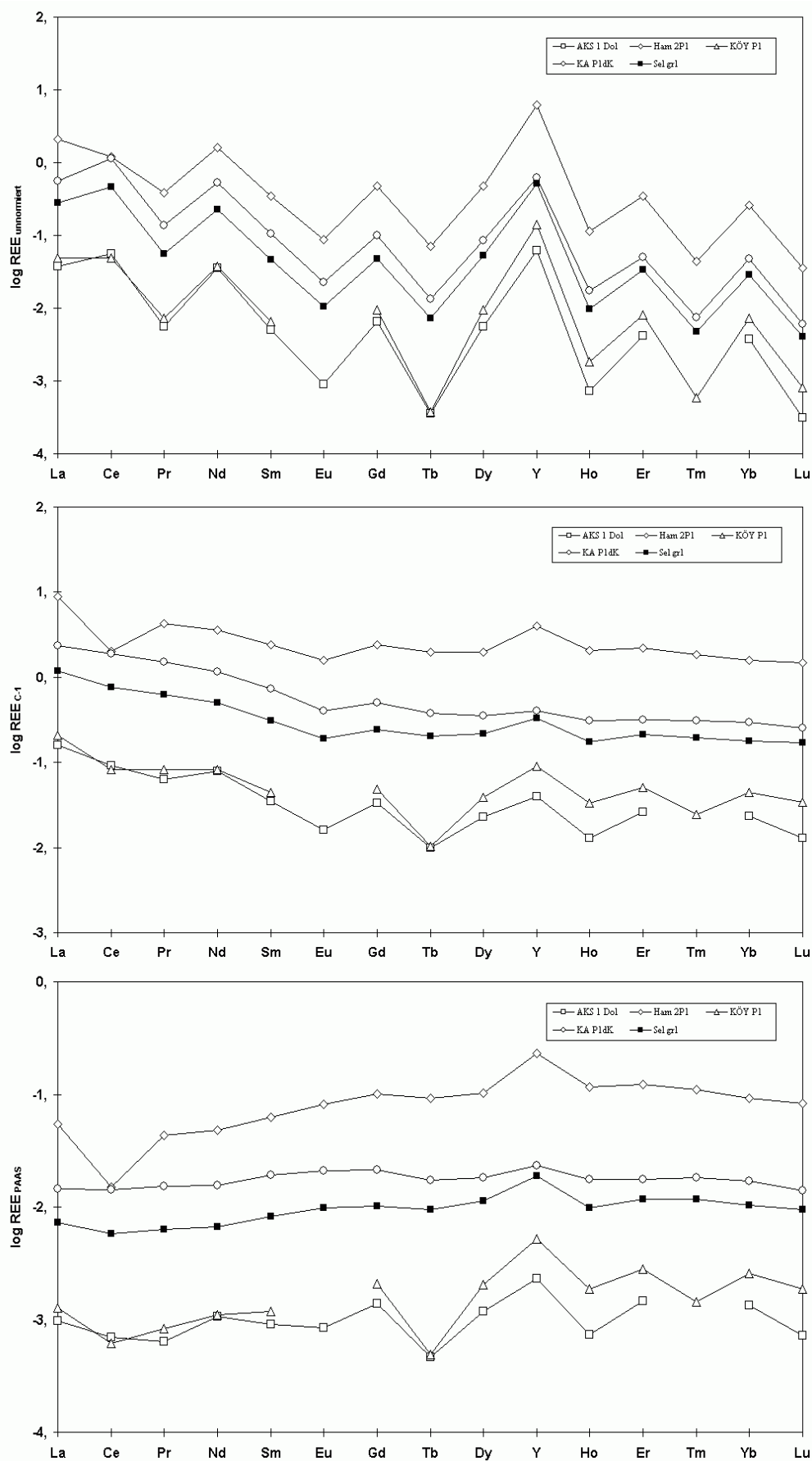


Abbildung 38: Verteilungsmuster der SEE in Marmoren von Marmara und dem Kozak bei Pergamon (Selgr); unnormiert (o), C1-Chondrit-normiert (m), PAAS-normiert (u.)

Das **molare Y/Ho-Verhältnis** wird durch Multiplikation mit 1,847 größer als das reine Zahlenverhältnis, ist aber besser vergleichbar mit Literaturdaten über die Elementfraktionierung in oxischen Gewässern.

Unabhängig von der gewählten Normierung sind die unterschiedlichen Elementgehalte jedoch immer erkennbar, weshalb in dieser Arbeit sowohl PAAS-normierte als auch unnormierte Diagramme verwendet werden.

4.6.2 Geowissenschaftliche Interpretation der SEE-Verteilungsmuster

Bei der Verwitterung kontinentaler Kruste werden die SEE in das Meerwasser eingebracht. Fraktionierungsprozesse im marinen Milieu führen zu Abweichungen gegenüber PAAS, in erster Linie aufgrund der geringen Löslichkeit der SEE zu einer generellen Verarmung ($>>1$). Die Fraktionierung wird u. a. von Druck, Temperatur, den Redox-Bedingungen, Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Salinität, der Möglichkeit zur Komplexbildung, der Anwesenheit organischer und anorganischer Substanzen usw. kontrolliert. Die hierbei entstehenden Verteilungsmuster der SEE können sich bei im marinen Milieu gebildeten Sedimenten durchpausen.

Die wichtigsten Fraktionierungsprozesse seien kurz erläutert, der Index SN bedeutet „Tonsteinnormiert“.

Wie in Abbildung 38 erkennbar, weisen im Vergleich zur Chondritnormierung auf PAAS normierte SEE im Meerwasser eine Zunahme der schwereren SEE auf. Doch treten bei verschiedenen Marmoren zusätzliche charakteristische Abweichungen auf. Bei ähnlichen Absolutgehalten zeigen die aus dem westlichen Menderesgebiet stammenden Euromos-Marmorproben⁴¹ (dickere Linien in Abbildung 39) einen recht geraden Kurvenverlauf. Bei den Marmorproben vom Großen Fries des Pergamonaltars fällt hingegen sofort nicht nur die ausgeprägte negative Cer-Anomalie auf: Beispielsweise ist auch das Verhältnis La_{SN}/Yb_{SN} kleiner 1; demgegenüber zeigen La_{SN} , Eu_{SN} , Gd_{SN} sowie Y_{SN} positive Anomalien.

Dieses Verteilungsmuster ist charakteristisch für die Bildung eines Sediments in oxischem und suboxischem Meerwasser (BAU *et al.* 1995; BAU *et al.* 1996):

Die meisten SEE treten nur als dreiwertige Kationen auf, Europium auch als Eu^{2+} . Ce^{3+} hingegen wird unter oxidierenden Bedingungen vierwertig – wobei sich der Ionenradius um ca. 15% reduziert. Seine ionare Löslichkeit nimmt dann ab, und es kann leicht in Manganknollen etc. fixiert werden, was dann zu einer für oxisches Meerwasser – und den mit ihm im Gleichgewicht gebildeten Phasen – charakteristischen Cer-Verarmung führt.

Schon geringe Mengen an kontinentalem Flusswasser- und Detrituseintrag können diese vor allem für pelagische Sedimente charakteristische Signatur ändern und die negative Cer-Anomalie zum Verschwinden bringen.

Ähnliches gilt für die molaren Y/Ho-Verhältnisse. Diese liegen in Chondriten, Tonsteinen und Magmatiten relativ einheitlich um 52, weisen im Meerwasser jedoch eine stärkere Fraktionierung mit positiven Anomalien (um 100) auf (BAU *et al.* 1995). Terrigener Detritus wirkt sich auch hier "normalisierend" aus. So vermuten BAU *et al.* (1996), dass äolischer Eintrag von Sahara-Staub für die gegenüber pazifischem Meerwasser geringeren Y/Ho-Verhältnisse im Mittelmeer verantwortlich sind. Bei den Pergamonaltar-Marmoren liegen die Y/Ho-Verhältnisse zwischen 80 und 132, mit einem Mittelwert um 93. Die Euromos-Marmore variieren zwischen 61 und 70 mit einem Ausreißer bei 81, ähnlich bei den Akkaya-Proben. Auch sonst differiert das SEE-Verteilungsmuster der Euromos-Marmore kaum von denen der nahe bei Pergamon gelegenen Akkaya-Brüche, die als mögliche Herkunftsquelle des Pergamonaltars galten. Mit einer Ausnahme: das La/Lu-Verhältnis der letzteren liegt zwischen 112 und 148, der Euromos-Marmore zwischen 69 und 86. Doch unterscheiden sich beide in petrographischen, isotopischen und auch den sonstigen geochemischen Merkmalen hinreichend deutlich.

⁴¹ Zu den hier verwendeten Lagerstättenmarmoren siehe die entsprechenden Kapitel 6.1 (Marmara-Prokonnesos), 6.4.5 (Euromos im westlichen Menderesgebiet) und 7.7.2 (Kozak einschließlich Akkaya nördlich von Pergamon)

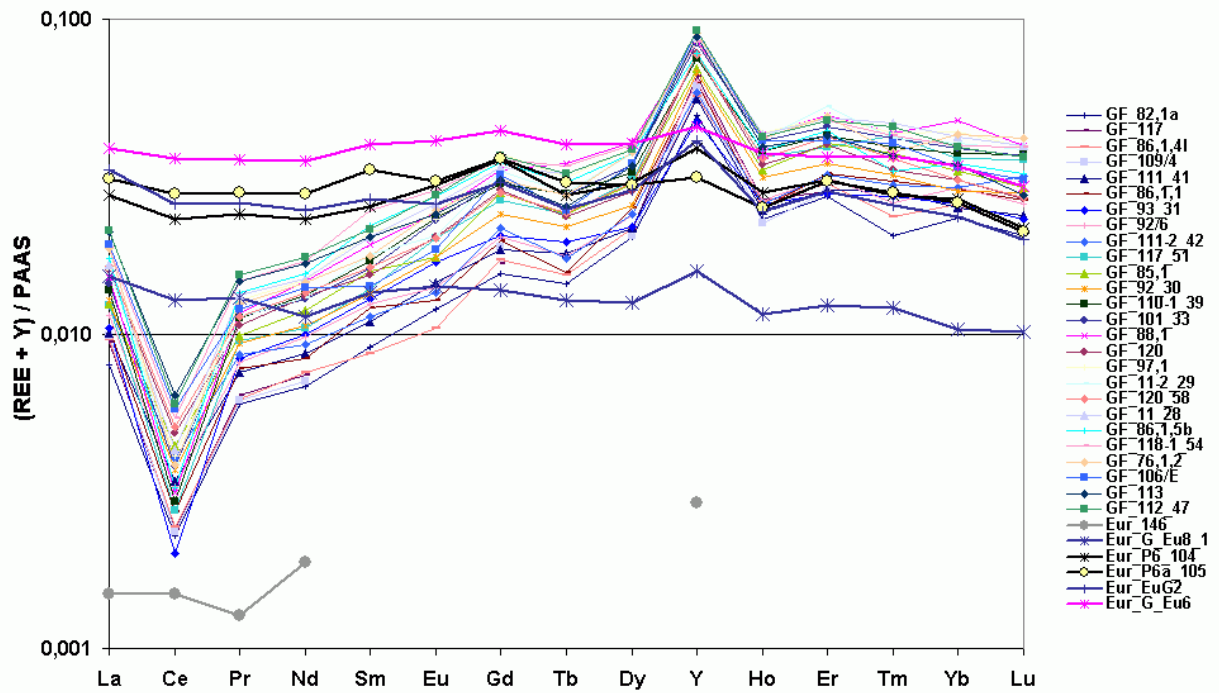


Abbildung 39: Bei stark unterschiedlichen Gesamtgehalten weisen die PAAS-normierten SEE der Marmore von Euromos östlich des Bafa-Sees einen fast horizontalen Kurvenverlauf auf, die prokonnesischen Marmore des Großen Frieses (GF) hingegen große Schwankungen der SEE-Gehalte, eine ausgeprägte negative Cer-Anomalie, $\Sigma SEE/Y$ -Verhältnisse von 1 gegenüber 5 bei den Akkaya-Marmoren sowie eine deutliche Fraktionierungstendenz zugunsten der schweren SEE auf

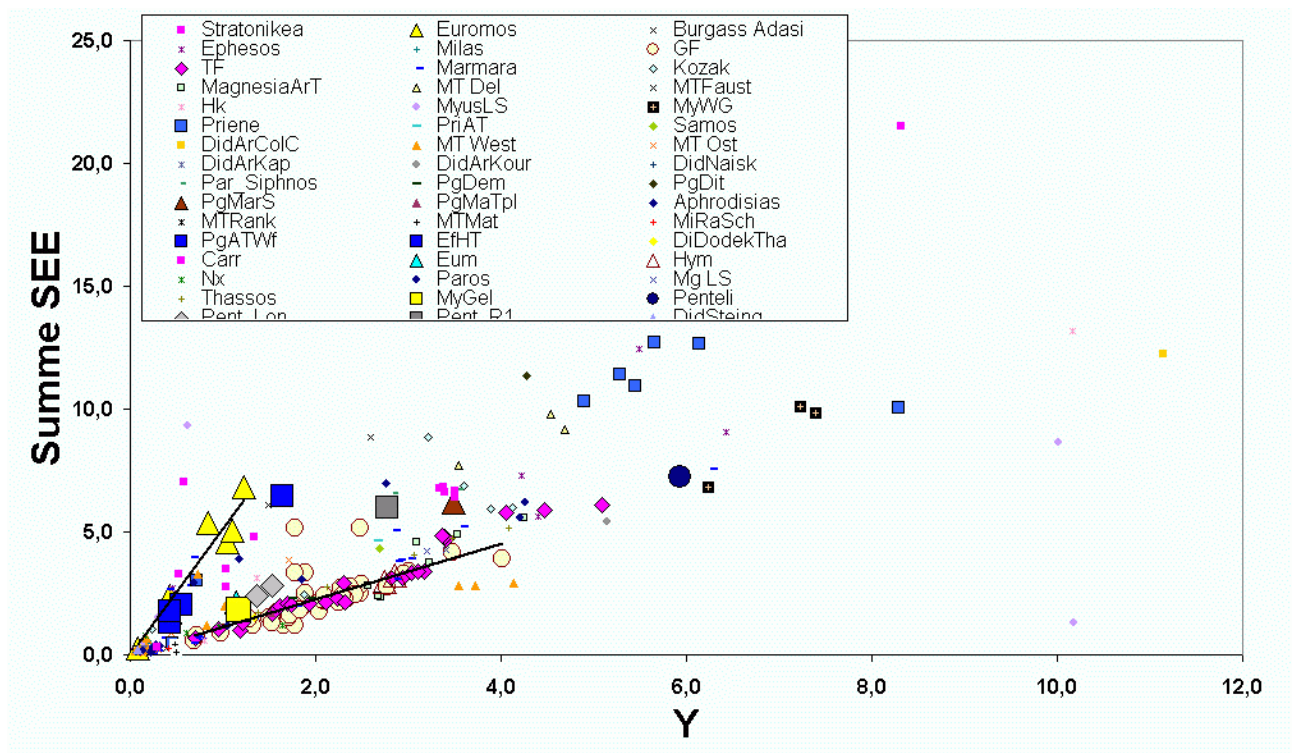


Abbildung 40: Summe der SEE zu Yttrium aller Marmore

Ein weiterer möglicher Herkunftsindikator ist das Verhältnis der Summe der SEE zu Y (Abbildung 40). So zeigt die Kurve der prokonnesischen Marmore eine wesentlich flachere

Steigung ($\Sigma SEE/Y$ um 1) als beispielsweise die Euromos-Marmore ($\Sigma SEE/Y$ 3,2-6,3).

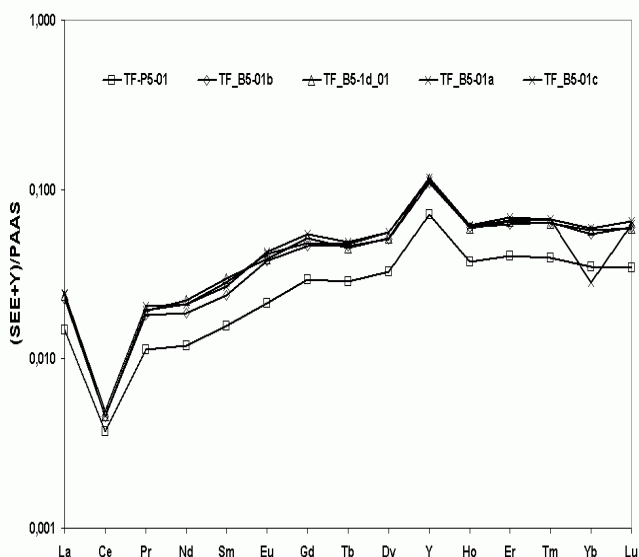


Abbildung 41: Fast identische SEE-Verteilungsmuster (1995 und 2001 gemessen) von Proben der Platte 5 des Telephosfrieses

Die Frage, warum gerade die prokonnesischen Marmore eine so große Spannweite in den Absolutgehalten der SEE bei ansonsten sehr ähnlichen Verteilungsmustern aufweisen, bedarf weiterer Untersuchungen; bis dato muss sie geradezu als lagerstättenspezifisches Merkmal hingenommen werden. Dass es sich um Messfehler oder den Einfluss akzessorischer Mineralien handelt ist unwahrscheinlich. Letzteres wird weiter unten ausführlich diskutiert. Auf den Einfluss möglicher Messfehler wurde schon eingegangen. Exemplarisch sind die Daten einer Platte des Telephosfrieses dargestellt, die 1995 und 2001 erfasst wurden (Abbildung 41). Die etwas niedrigeren SEE-Konzentrationen gehören zu einem Bohrpulver, das einer Bohrung in etwa 0,5 m Abstand von den anderen Proben entnommen wurde. Deren Werte verschiedener Fragmente der Reliefplatte einschließlich der später gemessenen Probe TF_B5-1d_01 (mit einem etwas niedrigerem Yb-Gehalt) stimmen jedoch so gut miteinander überein, dass sie kaum unterscheidbar sind.

Auch diese Beobachtung bestätigt, dass für die Herkunftsbestimmung antiker Marmore die Verteilungsmuster der SEE meist aussagekräftiger sind als ihre Absolutgehalte. Insbesondere erscheint es angesichts der beträchtlichen Schwankungen der SEE-Absolutgehalte innerhalb einer Lagerstätte höchst fragwürdig, deren Mittelwerte als Diskriminanzfaktoren heranzuziehen.

Die Vernachlässigung dieser Zusammenhänge erklärt vielleicht, warum in den bisherigen Marmor-Provenienzanalyse den SEE relativ wenig Bedeutung beigemessen wurde (s. Diskussion in Kapitel 3.3.3 auf S. 40). Natürlich können auch sie alleine – wie jede andere univariate Methodik – keine sicheren Aussagen liefern. Aber als ergänzendes Element haben sie sich z.B. für die Abgrenzung der petrographisch und teilweise isotopisch ähnlichen Pergamonaltar-Marmore von denen der Akkaya-Brüche bewährt.

Für die prokonnesischen Marmore stützt das SEE-Verteilungsmuster die Annahme, dass ihr prämetamorphes Edukt ein mariner Kalkstein war, der in einem Milieu ohne stärkeren kontinentalen Einfluss gebildet worden ist.

Auch die Faktorenanalyse bestätigt diese Zusammenhänge. Als brauchbare SEE-basierte Indikatoren werden deshalb aus der Anzahl denkbarer Elementverhältnisse Kennwerte für die negative Cer-Anomalie, das molare Y/Ho-Verhältnis und die $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ bevorzugt eingesetzt (s. Lagerstättenboxplots in Kapitel 5.1). Meist wird auch der Absolutgehalt der Summe der SEE angegeben.

4.6.3 Mögliche Korrelationen der SEE mit akzessorischen Mineralen und deren Elementen

Anlässlich einer Publikation (CRAMER *et al.* in press) wurde der Entwurf von einem international renommierten Experten für Marmorprovenienzanalyse u.a. mit der Begründung zurückgewiesen, die SEE könnten nicht als Herkunftsindikatoren dienen. Erstens seien sie vor allem in akzessorischen Mineralien wie Apatit und Pyrit enthalten, und zweitens würden letztere bei der Probenaufbereitung aufgelöst und damit die ICP-MS-Messwerte komplett verändern; aufgrund dieser Zufallsbedingtheit seien sie für die Provenienzanalyse ungeeignet. Diese Auffassung war ein zusätzlicher Anlass, eventuelle Korrelationen der SEE mit akzessorischen Mineralien in den Marmorproben genauer zu untersuchen. Mikroskopisch ließ sich ein solcher Zusammenhang nicht feststellen. Aber wenn die akzessorischen Mineralien eine ausschlaggebende Rolle spielen würden, müsste sich dies in einer sprunghaften Zunahme der SEE und der für viele akzessorische Mineralphasen charakte-

ristischen chemischen Elemente ausdrücken, insbesondere Eisen und Phosphor. Zwar stand weder die Erfassung von Phosphor mittels ICP-OES noch die von U, Zr oder Pb mittels ICP-MS im Vordergrund der Untersuchung, und einige dieser Daten sind nur sehr vorsichtig zu verwenden. Einmal liegen sie häufig im Bereich der

Nachweisgrenze, wurden von anderen Signalen teilweise überlagert oder können durch äußere Kontaminationen beeinflusst sein. Jedoch zeigte sich z.B. auch bei niedrigen Bariumgehalten eine gute Übereinstimmung der mit beiden Messtechniken erhaltenen Daten.

ΣSEE Korrelationskoeffizienten (KRK) nach PEARSON (1966) mit 2-seitiger Signifikanz																			
	Qz	Cc	Dol	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣSEE
KRK	,02	-,06	,06	,96**	,98**	1,00**	1,00**	,98**	,96**	,93**	,95**	,92**	,75**	,91**	,90**	,79**	,92**	,93**	1,00
Sig2	,78	,46	,46	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	.
N	138	138	138	307	306	275	279	246	225	261	229	261	300	240	262	209	252	210	310
	Hf	Pb	Th	U	Rb	Sr ICP-MS	Zr	Cs	Ba	Ca	Ba OES	Fe	Mg Gew%	Mn	P Gew%	Sr	Zn	δO	δC
KRK	,93**	,28**	,73**	,02	,16	-,11	,36**	,12	,37**	-,08	-,11	,44**	,05	,29**	,12	-,07	,49**	-,20**	-,05
Sig2	,00	,00	,00	,70	,29	,06	,00	,25	,00	,27	,34	,00	,39	,00	,39	,27	,00	,00	,43
N	28	274	167	259	48	297	274	92	277	199	85	261	261	261	51	262	111	258	258

Tabelle 12: Korrelationen zwischen ΣSEE und Elementen bzw. den Mineralphasen Quarz, Calcit und Dolomit

Im Kapitel 10.13 (Anhang auf S. 317) sind die mittels SPSS nach PEARSON (1966) ermittelten Korrelationen der chemischen Elemente zusammengefasst. Stark lineare Korrelationen können bei Korrelationskoeffizienten (KRK) zwischen 0,9-1 angenommen werden. Wegen der großen Datenmenge ließen sich dort auf einer Seite nur die reinen KRK angeben. Tabelle 12 gibt einen Auszug wieder, in dem zusätzlich die 2-seitigen Signifikanzniveaus⁴² und die Anzahl N der von der ΣSEE mit den anderen Elementen gebildeten Wertepaare⁴³ dargestellt sind. Neben trivialen Zusammenhängen, wie, dass hohe Dolomitgehalte stark positiv mit Mg korreliert sind, zeigt sich zwischen den SEE eine sehr hohe Korrelation oft bei 1, die sich auch in deren sehr ähnlichen Verteilungsmustern niederschlägt. Gerade dort, wo sich Abweichungen von 1 zeigen, besteht aber auch die Chance, dass diese durch lagerstättenspezifische Besonderheiten hervorgerufen wurden und damit für die Herkunftsbestimmung geeignet sind. Dies gilt z.B. bei ΣSEE/Y. Bei Tm/ΣSEE zeigen sich ebenfalls

⁴² je näher Sig2 bei 0, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass das Ergebnis nicht zufällig ist, sondern eine reale lineare Korrelation ausdrückt.

⁴³ N hängt von den aus einer Probe erhaltenen gemeinsamen Messwerten und der Überschreitung der Nachweisgrenze ab.

Unterschiede zwischen manchen Lagerstätten, aber aufgrund vieler fehlender Tm-Werte sind sie weniger brauchbar.

Signifikante, wenngleich meist wesentlich niedrige KRKen bestehen z.B. zwischen der ΣSEE und Hf (0,93 - allerdings nur 28 Wertepaare!), Th, Zr, Pb und Zn. Hier ist jedoch unsicher, wieweit es sich um reale Werte handelt. So weisen die wenigen – sehr niedrigen! - Hf-Werte hohe KRKen zwischen 0,5-0,98 mit Th, U, Zr, Pb, Rb, Cs und Ba auf; Zr mit Th; Cs mit Quarz, Rb, Ba und teilweise Fe; Pb (<0,5) mit P, Th, Mn, Fe und δO usw. Lediglich für Zn liegt der KRK bei den SEE (um 0,5) deutlich höher als bei den anderen Elementen.

Interessanter sind die Korrelationen mit Fe und Mn, die weiter unten ausführlicher behandelt werden.

Die Ba-Werte zeigen deutlich die Grenzen einer lediglich auf KRKen gestützten Dateninterpretation auf. Obwohl die mittels ICP-MS und OES ermittelten Werte ab etwa 1,5 ppm sehr gut übereinstimmen, werden aufgrund niedrigerer Nachweisgrenzen bei ICP-OES nur 85 statt 277 Wertepaare gebildet. Und interessanterweise wird eine positive Korrelation gerade bei dem ICP-MS-basiertem Datensatz errechnet, der sehr niedrige Ba-Gehalte einschließt!

Eine weitere pauschale Auswertungsmöglichkeit wird bei der Faktorenanalyse gezeigt. An dieser Stelle werden jedoch zunächst Zusammenhänge

anhand der Diagramme in Abbildung 42 unter Einbeziehung der mittels SPSS errechneten KRKen untersucht.

In den meisten Diagrammen zeigen sich vollkommen unregelmäßige Verteilungsmuster, aus deren Achsenabschnitten zugleich die Variation der chemischen Elemente in den untersuchten Marmoren abgelesen werden kann.

Die meisten P-Gehalte liegen unter der Nachweisgrenze, sollten aber durch relevante Apatitanteile erhöht sein, und mit ihnen auch die SEE. In *b*) ist ein solcher Trend nicht erkennbar (lediglich zwischen P und Pb wurde ein KRK von 0,4 bei 51 Wertepaaren errechnet). Beim Pergamonaltar, der eine sehr breite Spannweite der SEE mit teilweise hohen Gehalten aufweist, wurden nur gleichmäßig niedrige P-Gehalte gemessen (*a*). Deutlicher ist der positive Trend bei Fe (*e, f, g*) und Mn (*c*). Er wird auch durch die KRKen gestützt. Ein Blick auf die Datenpunkte relativiert aber die errechneten Korrelationen. Ihr Verteilungsmuster ähnelt einem Dreieck, dessen Hypotenuse von gleichzeitig anwachsenden Fe- und Σ SEE-Gehalten gebildet wird. Bei Betrachtung der Pergamonaltar- sowie aller Marmara-Marmore verwischt für Fe die obere Grenzlinie fast vollständig zu einer Horizontalen.

Dass etwas mehr höhere Mg-Werte (*d*) auch bei höheren SEE-Gehalten auftreten, ist zufällig, zumal sich in diesem Bereich auch sehr niedrige Mg-Werte häufen. Von der für Ba (ICP-MS) errechneten Korrelation ist in *i*) nicht einmal ansatzweise etwas zu erkennen. Bei sämtlichen anderen Elementen zeigen sich ebenfalls sehr diffuse Verteilungsmuster.

Wird die Σ SEE durch einzelne SEE-Elemente ersetzt, ergibt sich ein ähnliches Bild. Aufschlussreich ist, dass lediglich Cer (*p*) in einem schmalen Band stärker mit Fe korreliert, wobei dies bei den prokonnesischen Marmoren (*q*) wiederum nicht mehr zutrifft.

Wie sind diese Zusammenhänge zu deuten? Selbstverständlich lässt sich nicht ausschließen, dass gelegentlich in akzessorischen Mineralien angereicherte SEE herausgelöst werden und die Messwerte beeinflussen. Sämtliche hiermit verbundenen Fragen zu klären, würde sowohl den Rahmen dieser Arbeit als auch die Möglichkeiten der zur Verfügung stehenden Analytik sprengen. Doch erlauben die vorliegenden Daten eine hinreichend schlüssige Interpretation:

Mn wie Fe sind Elemente, die sehr gut in das Karbonatgitter eingebaut werden können. Wie in Kapitel 4.6.1 ausgeführt, trifft dies aber auch auf die SEE zu. Die in den Diagrammen auftretenden Verteilungsmuster bestätigen dies. Bei Fe und Mn deutet die „Hypotenuse“ die obere Grenzlinie für koexistierende Gehalte an SEE und Fe bzw. Mn an. Unterhalb dieser erfolgt der Einbau je nach zur Verfügung stehendem Elementinventar sowie den komplexen Bildungsbedingungen sehr unregelmäßig. Für die SEE kann eine nur geringe Veränderung des Ausgangsbestands während der Diagenese und Metamorphose angenommen werden. Anders bei Fe und Mn. Auch wenn die durchschnittlichen Elementgehalte für Kalksteine in Tabelle 20 den Gesamtchemismus einschließlich akzessorischer Fe-Mineralen beinhalten, kommt es während der Marmorgenese zu stärkeren Verarmungen besonders von Fe und Mn im Karbonatgitter. Deshalb ist die Grenzlinie nicht direkt als „Gleichgewichtszustand“ während der Sedimentation zu interpretieren⁴⁴. Geringer sind die Verarmungen von Sr, das fast vollständig in das Karbonatgitter eingebaut wird und überhaupt keine Korrelation mit den SEE zeigt (*k*) (und auch sonst nur mit Ba (KRK 0,5) und – besonders aufschlussreich – mit δC (0,3)). Jedenfalls wurde bei Fe-reichen ankeritischen Karbonatiten beobachtet, dass diese, verglichen mit Calciten, besonders hohe SEE-Gehalte aufweisen (WALL & MARIANO 1996). Auch zu Fe-Hydroxiden zeigen die SEE eine höhere Affinität. Bei Mn zeigt sich ein auf die leichten SEE von La bis Dy beschränkter signifikanter KRK von 0,2-0,33, aber von 0,44 für Fe-Mn. Möglicherweise ist die SEE-Korrelation von Mn auch über die von Fe gekoppelt.

Besonders eng ist der Zusammenhang zwischen Fe- und Ce-Gehalten (*p*) – mit einem KRK von 0,65! Dieser wird durch einen Blick auf die Ergebnisse der Faktorenanalyse in Tabelle 17 auf Seite 84 noch besser interpretierbar: Fe, Mn und Quarz sind zusammen mit Cer in der Komponente 3 mit hoher Faktorladung zusammengefasst. Für das SEE-Muster viel ausschlaggebender als zufällig erfasste SEE-Anreicherungen in akzessorischen Mineralen ist demnach der Ein-

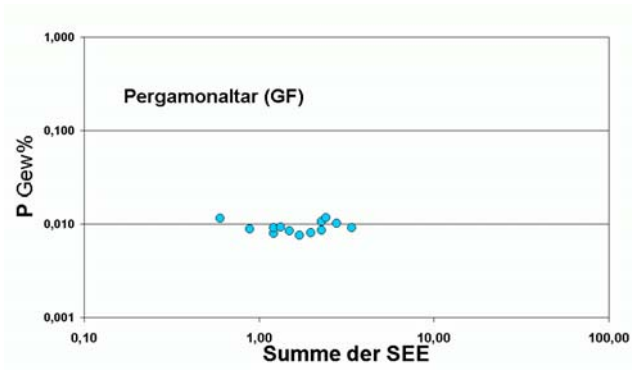
⁴⁴ Näheren Aufschluß über diese Fe-Verarmung im Verhältnis zu den SEE könnte die Untersuchung von möglichst reinen Kalksteinen liefern.

trag von kontinentalem Detritus in den marinen Sedimentationsraum. Die Verarmung von Cer in oxischem Meerwasser wird hierbei aufgehoben, mehr Cer (und Fe) kann in das Karbonatgitter eingebaut werden, was wiederum im Verschwinden der negativen Cer-Anomalie resultiert.

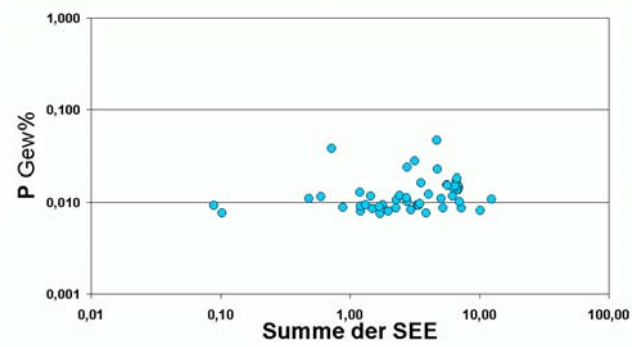
Für die Möglichkeit der Herkunftsbestimmung von Marmoren ist geradezu Voraussetzung, dass die Elementkorrelationen weder streng linear noch absolut zufällig sind. Erst dadurch lassen sich überhaupt lagerstättenpezifische Signaturen detektieren. Dies zeigt sich z.B. in den Diagrammen der prokonnesischen Marmore (*q*), die bei sehr niedrigen Cer-Gehalten eine positive Korrelation mit Fe nicht einmal ansatzweise erkennen lassen. Der niedrigeren Gesamtkorrelation zwischen Y und der Σ SEE stehen lagerstättenpezifische Σ SEE/Y-Verhältnisse gegenüber. Ebenso beträgt der KRK von Sr mit Fe oder den SEE pauschal bei allen Marmoren 0, aber die Fe/Sr-Verhältnisse sind ein sehr nützliches Unterscheidungsmerkmal zahlreicher Lagerstätten.

Zusammenfassend lassen sich auch unter den hier betrachteten Gesichtspunkten die Schlussfolgerungen von Kapitel 4.6.2 bekräftigen und folgendermaßen ergänzen:

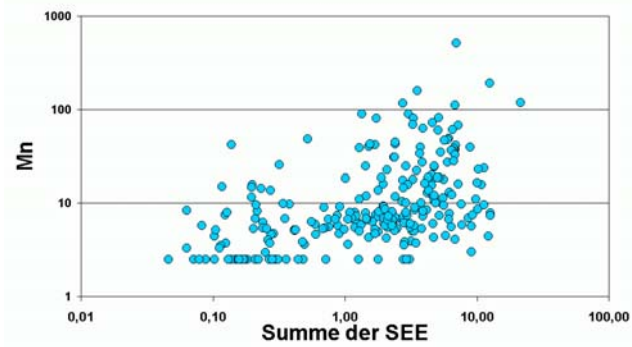
1. In den weißen bis grauen Marmoren besteht kein erkennbarer Zusammenhang zwischen den SEE-Gehalten und akzessorischen Mineralphasen.
2. Die mittels ICP-MS detektierten SEE-Gehalte sind wesentlich in das Karbonatgitter eingebaut, können in ihren Absolutgehalten stark variieren und werden durch die Marmorgenese beeinflusst.
3. Die SEE-Verteilungsmuster und Elementverhältnisse zeigen teilweise lagerstättenpezifische Signaturen. Dies sind insbesondere Σ SEE/Y, Ce_{neg} und Y/Ho, die zusammen mit Fe/Sr und anderen geochemischen und isotopischen Kennziffern eine für die Herkunftsbestimmung nützliche und manchmal unverzichtbare Ergänzung petrographischer Merkmale liefern können (vgl. Boxplots in Abbildung 72, S.95).



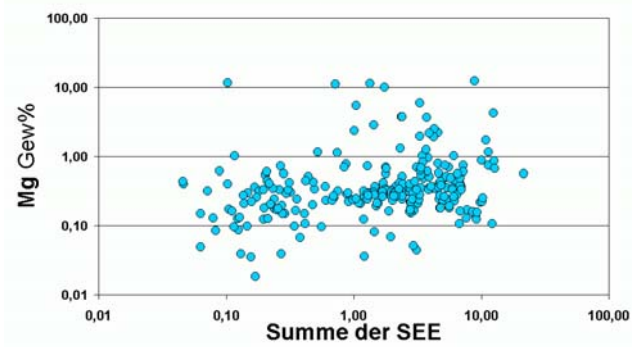
a)



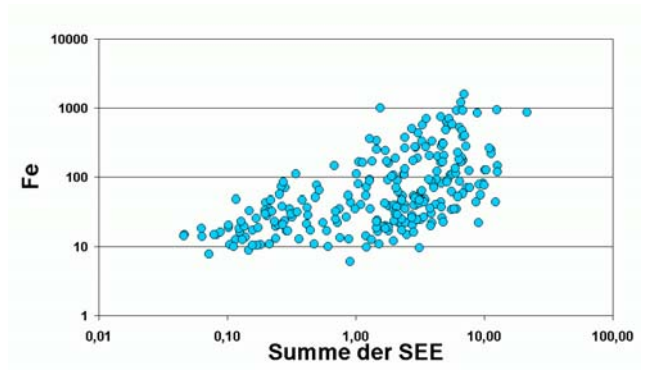
b)



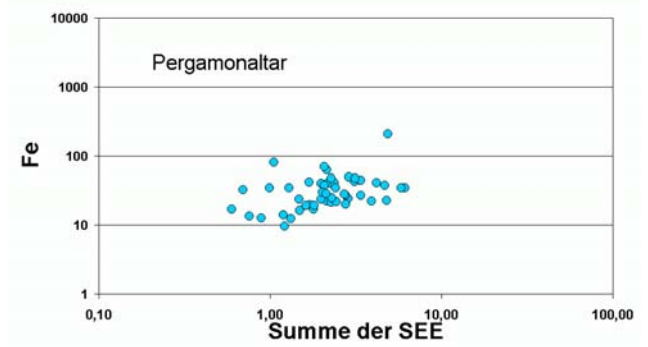
c)



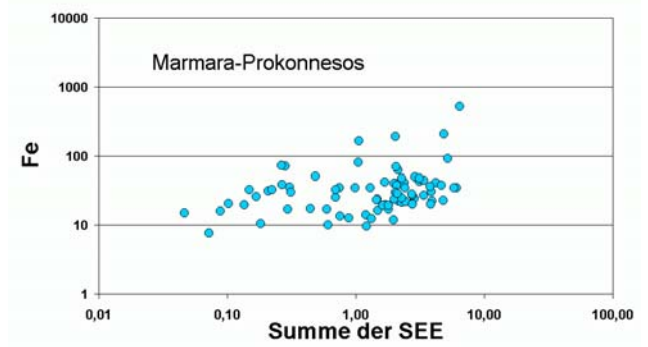
d)



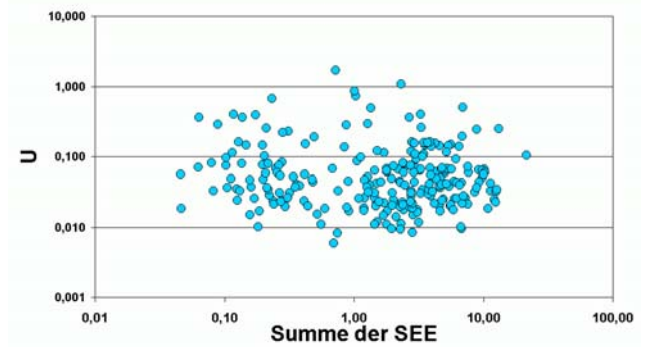
e)



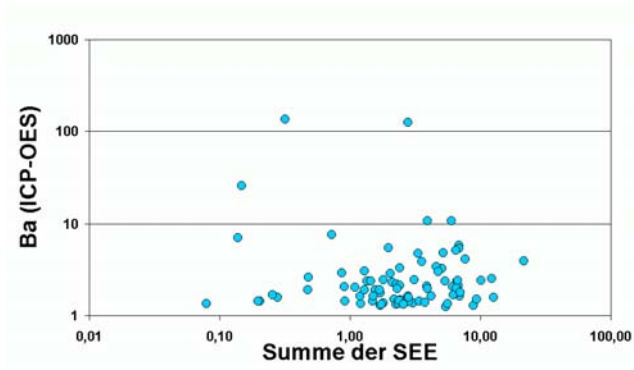
f)



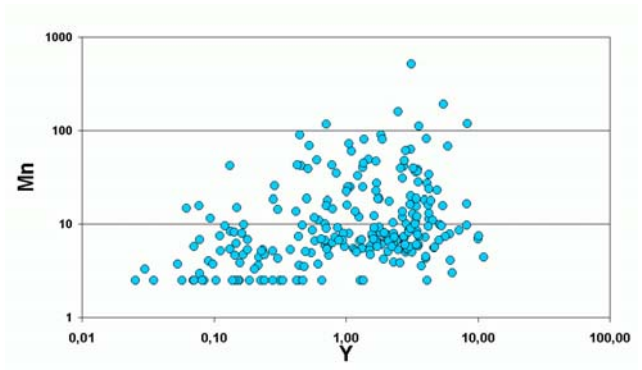
g)



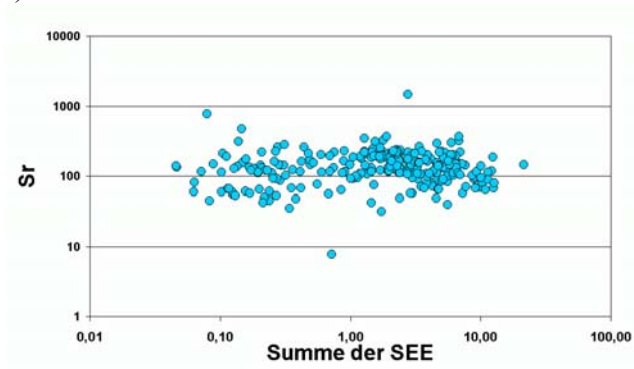
h)



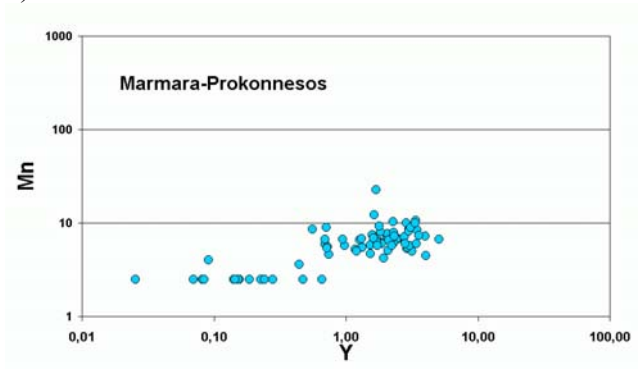
i)



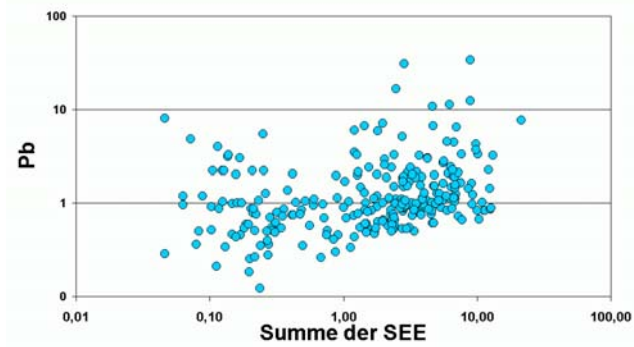
n)



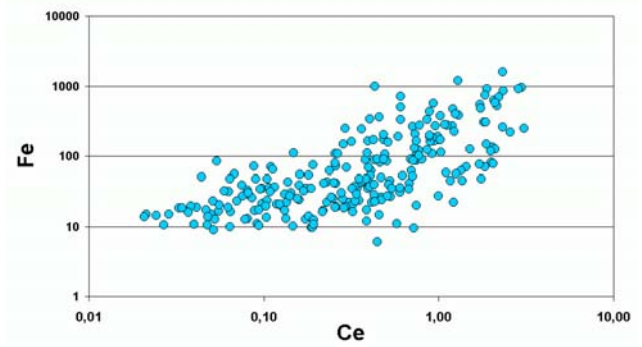
k)



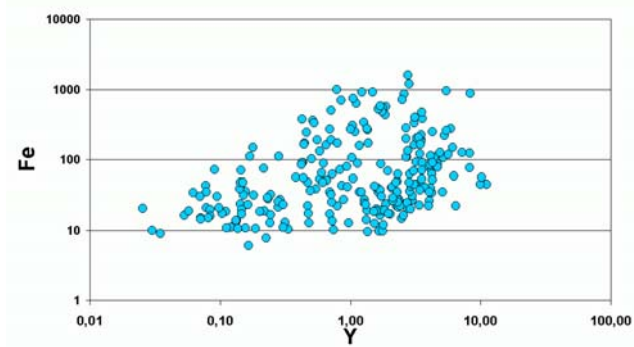
o)



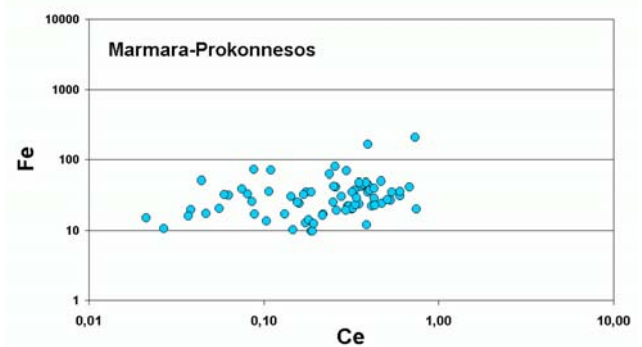
l)



p)



m)



q)

Abbildung 42 a-q: Korrelationsdiagramme der SEE und Y über Mg, Fe, Mn, Sr, Ba, Pb, P, U und Zr. Mg und P in Gew%, alle anderen Angaben in ppm. Soweit nicht anders angegeben, wurden weiße bis graue Marmore aller Lagerstätten und Museumsobjekte ausgewertet

4.7 Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopie

Für die **Isotopenmessung an 378 Proben** wurden am GFZ-Potsdam je 10-15 mg Marmorpulver in Phosphorsäure aufgelöst und das aufgefangene CO₂ anschließend massenspektrometrisch untersucht. Jede 6. Messung wurde mit einem Kalksteinstandard (KH-2) kalibriert. Die auf PDB normierten Messwerte sind in Promille Abweichung δ_{PDB} angegeben (s. Kapitel 3.4 und Tabelle im Anhang 10.14).

Probe/Platte am Telephosfries	δO	δC
TF_B 34-2-u2 (2001)	-3,00	3,20
TF_B34-2-o (1995)	-3,20	3,30
TF_B34-01 (1995)	-2,30	3,40
TF_Fr16	-0,90	3,40
TF_Fr16_01 (2001)	-0,90	3,46
TF_Fr2	-8,90	2,60
TF_Fr2_01 (2001)	-7,36	2,75
TF-P11-21u-1	-0,70	2,50
TF-P11-21-u2_01 (2001)	-0,85	2,49
TF-P01-u1_01	-10,95	2,57
TF-P1-u2 (2001)	-9,40	2,60

Tabelle 13: Isotopiewerte gleicher in 1995 und 2001 gemessener Telephosfriesplatten

Vergleichsmessungen an Probenmaterial vom Telephosfries, der bereits 1995 von F.J. Winkler an der Technischen Universität München isotopegeochemisch untersucht worden war, zeigten im Rahmen der natürlichen Schwankungen innerhalb einer Platte eine sehr gute Übereinstimmung (Tabelle 13). Sie belegen, dass bei guter Kalibrierung die Isotopiemesswerte in verschiedenen Laboratorien auch über einen längeren Zeitraum sehr gut reproduzierbar sind. Die Variationen innerhalb einer Platte oder gar einer Marmorlagerstätte können demgegenüber wesentlich größer sein, wie für δO innerhalb zweier 1995 gemessener Fragmente der Platte 34 (Hervorhebung in Tabelle 13).

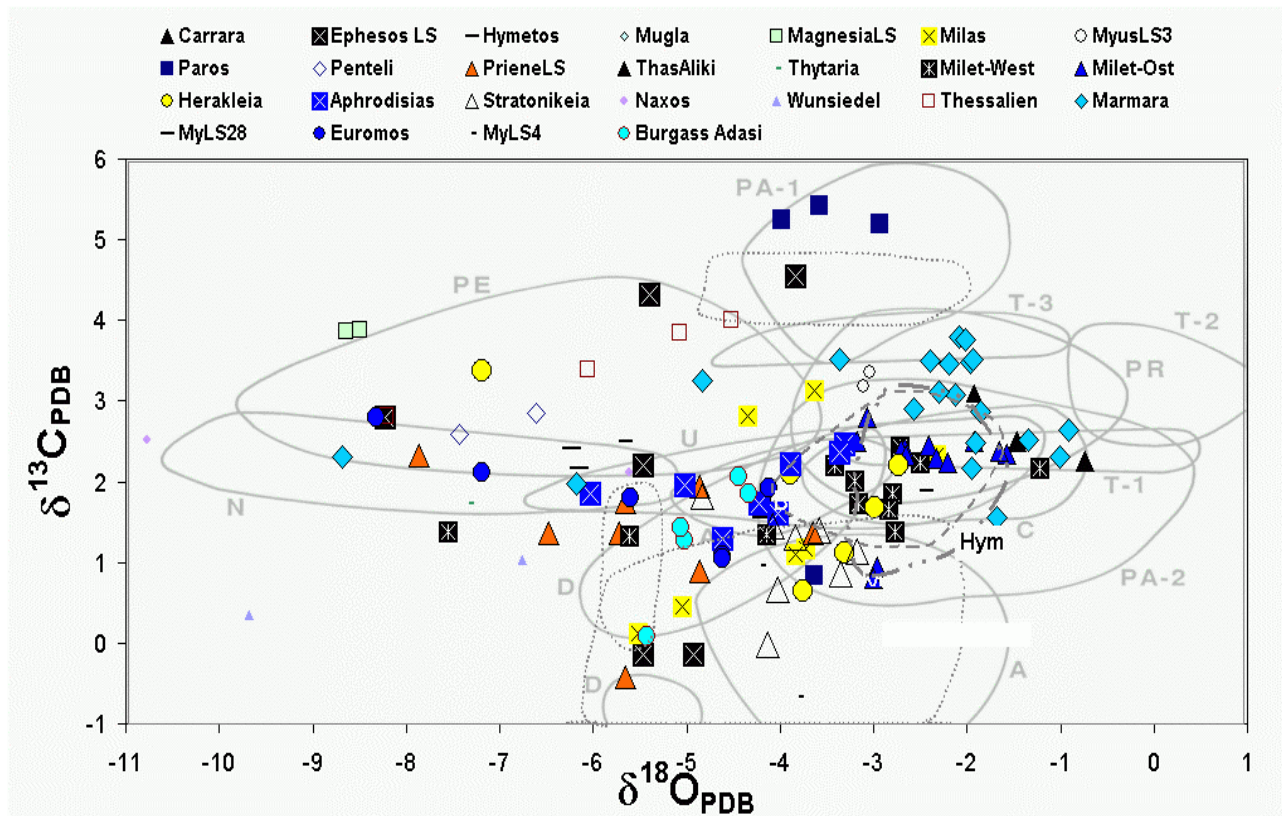


Abbildung 43: Isotopie untersuchter heller Marmore von Lagerstätten (ohne Prokonnesos). Selbst definierte Felder s. Kapitel 7.2. Im Hintergrund Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987) A: Aphrodisias, BG: Bafa-See, C: Carrara, D: Dokimeion-Afyon, Ef: Ephesos, Hym: Hymettos, N: Naxos, PA: Paros, PE: Pentelikon, PR: Prokonnesos-Marmara, T: Thasos, U: Uşak.

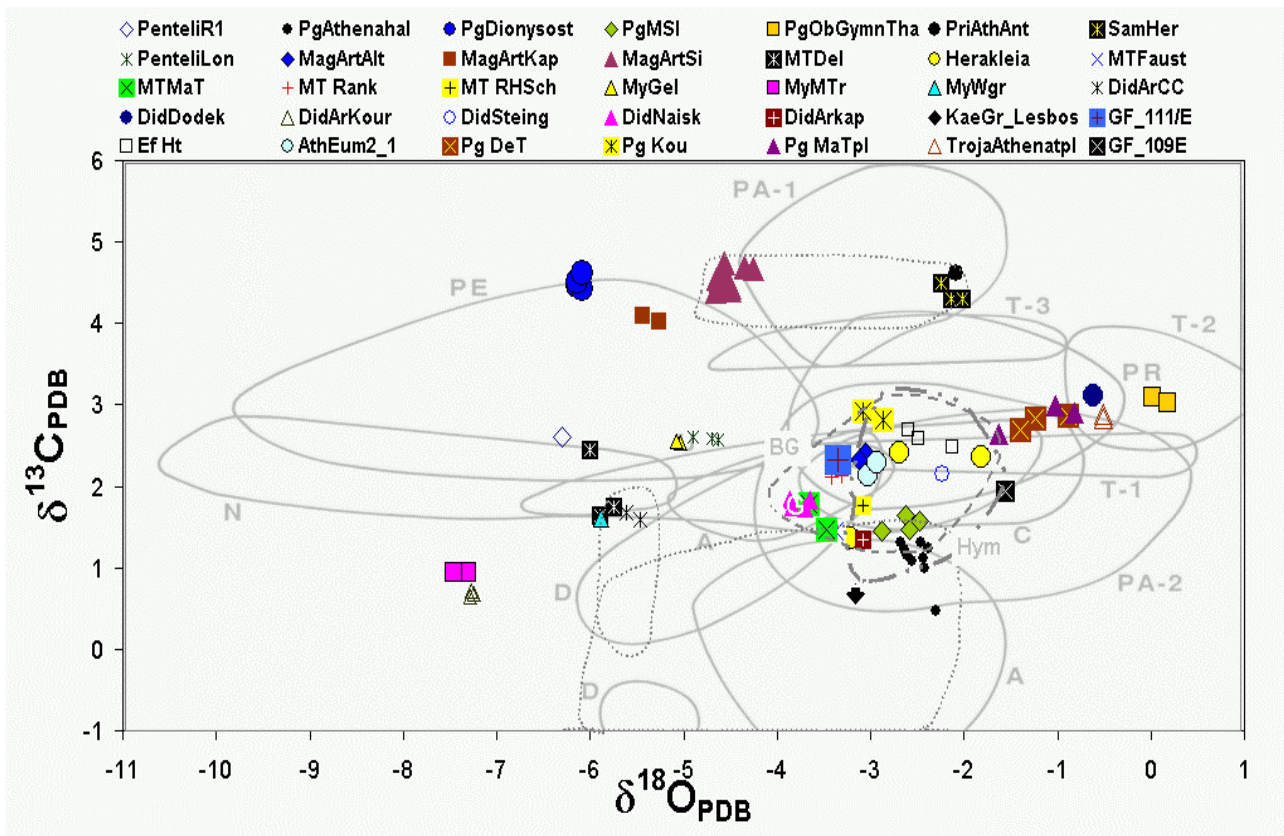


Abbildung 44: Isotopie der meisten antiken Objekte (ohne prokonnesische Marmore). Felder nach MOENS *et al.* (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende Abbildung 13

In Abbildung 43 sind die $\delta C/\delta O$ -Isotopendaten der meisten untersuchten Lagerstättenmarmore aufgetragen. Im Hintergrund sind noch einigermaßen übersichtliche Felder klassischer Marmorlagerstätten (MOENS *et al.* 1992) dargestellt, ergänzt durch eigene Eintragungen nach HERZ (1987) von Hymettos, Ephesos und den Brüchen am Ostufer des Bafa-Sees. Diese Felder dienen auch heute noch der mit der Marmorherkunftsbestimmung beschäftigten Fachwelt als Referenzpunkt. Die verwirrende Vielfalt der Isotopenverteilung verringert sich etwas in Abbildung 44, in der die Isotopenpaare der meisten untersuchten antiken Objekte (insbesondere ohne die zahlreichen Proben des Pergamonaltars prokonnesischer Herkunft, die viele der Messwerte überdecken würden) schon enger gruppiert sind und verdeutlichen, dass zumindest untereinander Zugehörigkeiten bestehen. In Kapitel 7.2 werden die meisten Lagerstätten- und Museumsmesswerte einschließlich der prokonnesischen aufgeschlüsselt und erläutert, sowie auch selbst definierte Felder vorgestellt. Da die Felder nach MOENS *et al.* (1992) und HERZ (1987) jedoch auf einen wesentlich größeren Datensatz klassischer Mar-

morlagerstätten beruhen und bekannter sind, werden sie hier meist verwendet.

Bei der Analyse der Häufigkeitsverteilung (Abbildung 45) wird besonders deutlich, dass sich bei den Sauerstoffisotopen die meisten Werte der 391 Marmorproben rechtsseitig um -4 gruppieren, dem Mittelwert mariner Karbonate, bei den Kohlenstoffisotopen hingegen symmetrischer um 2,4 verteilt sind. Die Hauptmenge der Isotopiemesswerte schart sich im Intervall $1 < \delta C < 4$ und $-6 < \delta O < -1$, wobei die Sauerstoffisotopie auch wesentlich weiter in den Bereich negativerer Werte ausgreifen kann und oft über -11 bis -16 hinausgeht. Hierbei spielt allerdings die große Zahl prokonnesischer Marmorproben eine Rolle, deren Hauptintervalle für δO zwischen -0,5 und -4 und für δC zwischen 2 und 3,5 liegen. Umgekehrt würde sich ohne den recht hohen Anteil der Meßproben von Marmoren aus Ephesos, Paros-Lychnites, Phourni und Magnesia mit δC -Werten um 4,5 die Verteilung weiter in Richtung auf leichtere δC -Werte verlagern. Eine größere Zahl pentelischer oder Naxos-Marmore würde zu Häufungen im Bereich besonders leichter O-Isotopen führen, und umgekehrt viele Proben von Tha-

so-Aliki den Schwerpunkt nach rechts verschieben, während die in Abbildung 43 und Abbildung 44 nicht dargestellten prokonnesischen Marmore wiederum meist im oben angegebenen Intervall liegen. Insbesondere Isotopiemesswerte außerhalb dieses Intervalls schränken die Zahl infragekommender Lagerstätten stärker ein, legen sie jedoch keineswegs zweifelsfrei fest. Zudem zeigen die meisten Lagerstätten (z.B. unter den hier gemessenen besonders Priene) eine beträchtliche Variationsbreite, während andere recht eng umgrenzte Felder belegen.

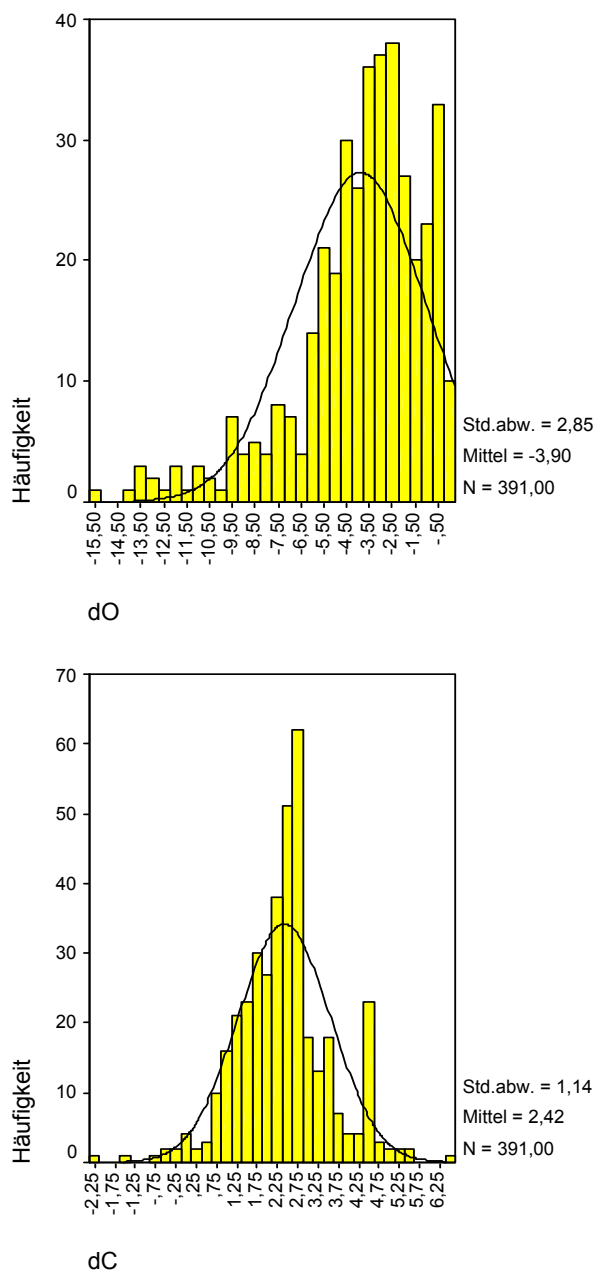


Abbildung 45: δO - und δC -Häufigkeitsdiagramme mit Normalverteilungskurve

Aus all diesen Gründen werden weitere Isotopiemesswerte detaillierter im Zusammenhang mit anderen Merkmalen bei der Besprechung der jeweiligen Lagerstätten bzw. antiken Objekte dargestellt.

Hier sei nur auf folgende **Besonderheiten** hingewiesen:

Keine der Marmorproben mit $\delta C > 3,8$ gehört der Marmorhülle des Menderes-Massivs an, die meisten hingegen dem durch Hochdruckmetamorphose gekennzeichnetem Kykladischen Komplex, dessen Ausläufer von Paros über Phourni bis in die Region von Ephesos und Magnesia reichen (s. Kapitel 6.4.2 und bes. 1.1.1).

Die höchsten gemessenen δC Werte stammen von parischen Lychnites (δC 5,44 / δO -3,00) mit relativ hohen Sr-Werten, für deren Ausgangsgesteine ein hochsalin角度es Bildungsmilieu angenommen wird. Übertroffen werden diese nur noch durch eine sehr grobkörnige (MGS 7,2, AGS 3 mm) weiße Marmorprobe aus dem afrikanischen Benin (δC 6,39 / δO -4,19) mit extrem hohen Gehalten an Sr (1400) und Ba (134 ppm).

Wie auch bei der Untersuchung der Korrelationen und durch die Faktorenanalyse (Kapitel 4.10) bestätigt, besteht generell kein Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung der Marmore und ihrer Isotopie – mit einer Ausnahme: Kohlenstoffisotopie und Sr sind miteinander positiv korreliert. Dies deckt sich mit der bekannten Annahme, dass die Ausgangsgesteine von Marmoren mit hohen δC -Werten in einem stärker salin角度en Milieu gebildet wurden. Dieser Zusammenhang darf jedoch nicht überinterpretiert werden, zumal es während der Diagenese und Metamorphose zu starken Änderungen der chemischen und isotopischen Zusammensetzung kommen kann. Er lässt sich besonders gut dort zeigen, wo stärkere Variationen der Kohlenstoffisotopie auftreten, wie z.B. im Bereich der parischen Lychnites (Abbildung 46). Bei diesen Proben können die Schwankungen durch Hinzuziehung der Werte des sehr mobilen Elements Eisen (Fe/Sr in Abbildung 47) weiter minimiert werden.

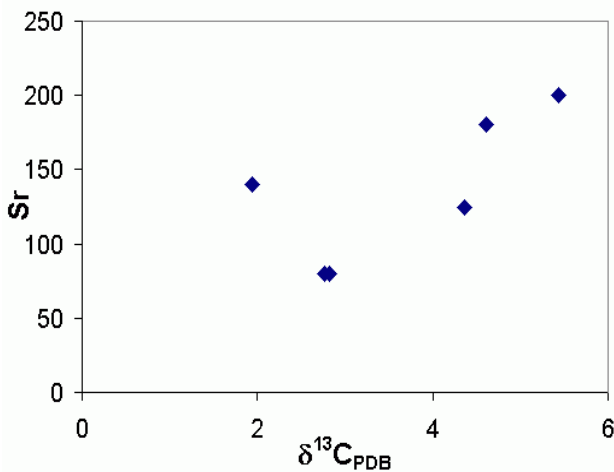


Abbildung 46: Positive Korrelation von Kohlenstoffisotopie und Sr (Paros-Lychnites)

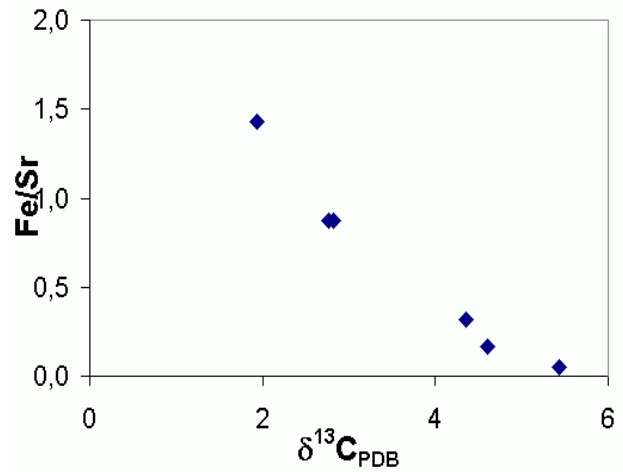


Abbildung 47: Negative Korrelation der Kohlenstoffisotopie mit Fe/Sr mit geringerer Abweichung als nur bei Sr

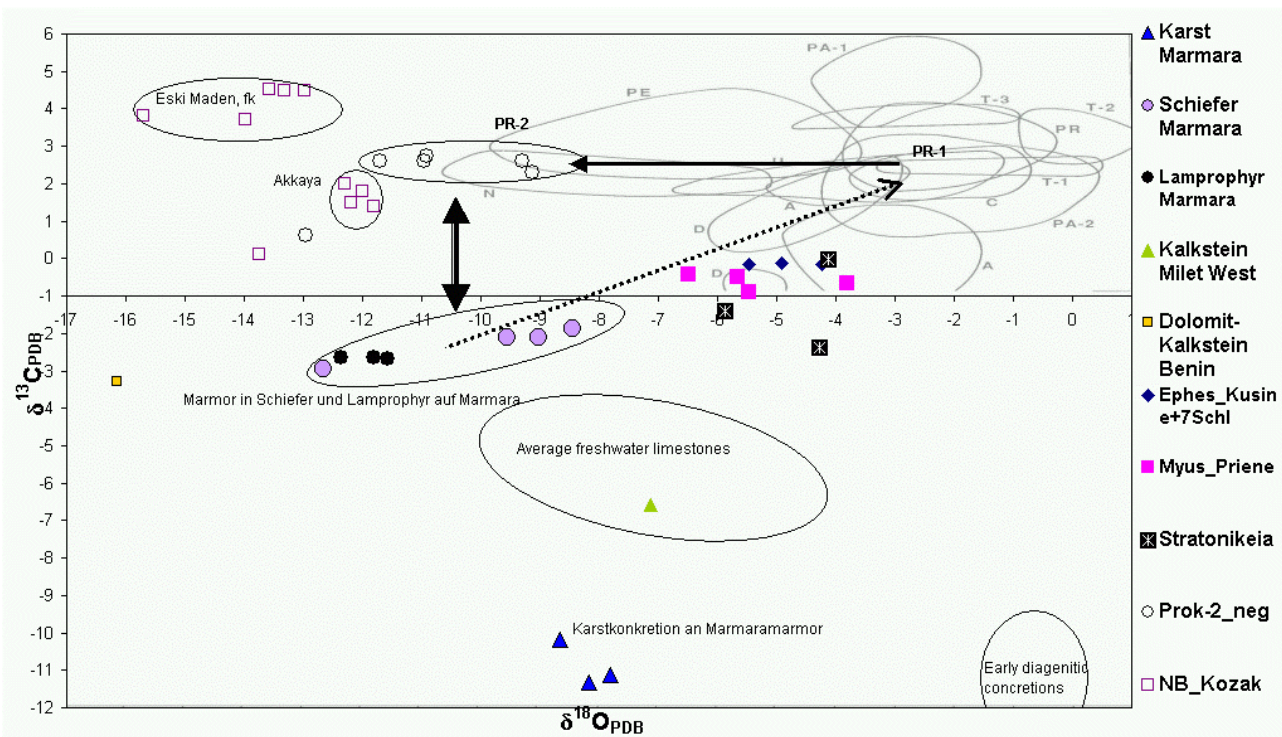


Abbildung 48: Marmorproben mit Verarmung schwerer Isotope. Das PR-2-Feld entstand offensichtlich aus PR-1-Marmoren auf Marmara (Prokonnesos) infolge von Wechselwirkung mit an schweren O-Isotopen verarmten Lösungen, die aus Schiefer- und Lamprophyrbildungsprozessen herrührten (unterbrochene Pfeillinie)

In Abbildung 48 sind Isotopiewerte von Proben eingetragen, die gegenüber den „normalen“ klassischen Marmorlagerstätten eine starke Verarmung der schweren Isotope aufweisen. Aus Marmara-Marmoren gebildete Karstkalksinter weisen die negativsten δC -Werte auf – noch unterhalb des von ANDERSON & ARTHUR (1983) für Süßwasserkalke angegebenen Feldes (vgl. Abbildung 14). Hierin drückt sich eine Angleichung an Isotopieverhältnisse in meteorischen Wässern aus. Auch die meisten Kalksteine und feinkörnigen Marmore zeigen ein mehr

oder minder starkes Vorherrschen leichter Isotope. Der mittelkörnige weiße Marmor von Ephesos-Kuşini und der dunkle Kalkstein aus der Siebenschläferhöhle⁴⁵ südlich von Ephesos haben sehr ähnliche Isotopiewerte. Auf die starke Variation gerade der ephesischen Marmore (mit zahlreichen δC -Werten über +4) wird im Kapitel 6.5.1 eingegangen. Sie gehören neben denen von Aphrodisias und Afyon-Dokimeia zu

⁴⁵ Zur Namensgebung s. Fußnote 59 im Ephesoskapitel.

den Lagerstättenrevieren mit besonders häufigen negativen δC -Werten. Auch nicht alle δC -negativen Myus- und Priene-Geländeplatten sind dunkel oder feinkörnig – anders als die von Stratonikeia.

Sämtliche Marmore aus dem Kozak nördlich von Bergama zeigen eine stark negative O-Isotopie. Dies gilt sowohl für die mittelgrobkörnigen Akkaya-Marmore (deren isotopische Nähe zu Proben des Pergamonaltars zunächst ihre fälschlicherweise vermutete Verwendung als sein Baumaterial zu bekräftigen schien) als auch für die feinkörnigen Marmore von Eski Maden mit einer sehr schweren Kohlenstoffisotopie bis +4,5.

Abbildung 48 könnte aber auch Aufschluss geben über Entstehungsursachen des von uns 1995 (CRAMER 1996) vermuteten und unterdessen auch von anderen Autoren (GORGONI *et al.* 2002) festgestellten 2. Isotopenfeldes PR-2 der prokonnesischen Marmore. Analysierte Marmorfragmente in Schiefen und magmatischen Ganggesteinen (Lamprophyren) von Marmara weisen durchweg eine starke Verarmung der schweren Isotopen auf (δC -1,88 bis -2,96; δO -8,44 bis -12,66). Da der Sauerstoffisotopentransport in Marmoren wesentlich schneller verläuft als der der Kohlenstoffisotope, kann angenommen werden, dass im Zusammenhang mit magmatischen und metamorphen Prozessen aufgetretene Fluide die δO -Signatur eines Teils der prokonnesischen Marmore um bis 10‰ in Richtung leichterer Werte verschoben haben. Gegen die Annahme einer wesentlich verwitterungsbedingten Verarmung (durch Interaktion mit in Regenwasser gelöstem CO_2) der schweren Sauerstoffisotopen spricht auch die Beobachtung, dass diese oft mit einer Verarmung der schweren Kohlenstoffisotope einhergeht. Dies lässt sich aber beim Vergleich mit dem klassischen prokonnesischen Feld PR-1 nicht beobachten, anders als bei einem dolomithaltigen (XRD 4 Gew%, Mg 1,1 Gew%) Probenfragment von Doğu Camlik. Sein auch niedrigerer δC -Wert (0,61, δO -12,96) trug dazu bei, dass er nicht für die Definierung des PR-2-Feldes aufgenommen wurde. Diese und andere Aspekte werden im Kapitel 6.1.2 und gegebenenfalls bei den entsprechenden Lagerstätten und Museumsproben detaillierter diskutiert.

Eine Korrelation zwischen Kornvergrößerung und Verarmung der schweren Sauerstoffisoto-

pen infolge höherer Metamorphose konnte nicht bestätigt werden, mag aber in Einzelfällen gegeben sein. Unter der Annahme einer gleichen lithologischen Ausgangssequenz der Kykladenmarmore war z.B. GERMANN & KNOLL (1987) aufgefallen, dass die parischen Marmore ein Feld mit schwereren δO -Werten belegen als die infolge intensiver sekundärer Metamorphose deutlich grobkörnigeren Naxos-Marmore. Ein ähnliches Phänomen lässt sich tendenziell an einigen Objekten aus etwas grobkörnigeren prokonnesischen Marmoren mit niedrigen δO -Werten beobachten (s. Telephosfries in Abbildung 323 und Abbildung 324 auf S. 225).

4.8 Elementkorrelationen und Verteilungsmuster

Die meisten Elementgehalte weichen von der Gauß'schen Normalverteilung ab, was bei verschiedenen statistischen Prozeduren (Faktor-, Cluster- und Diskriminanzanalyse) zu Problemen führen soll, da sie nur bei Normalverteilung optimal arbeiten. Bei nichtnormaler Verteilung werden nichtparametrische Auswertungsverfahren empfohlen. Deshalb war zu testen, ob solche Verfahren erforderlich sind und gegebenenfalls z.B. mittels einer lognormalen Transformation Normalverteilung erzwungen werden muss.

In Tabelle 14 und Tabelle 15 wurden die Korrelationskoeffizienten (KRK) und Signifikanzen einiger Phasen- und Elementkombinationen nach PEARSON (1966) und mittels des nichtparametrischen Verfahrens nach SPEARMAN (1908) ermittelt. Letzteres betrachtet die Datenwerte als ordinal, weist ihnen also einen Rang zu, aber ohne ein gemeinsames Distanzmaß. Demgegenüber nimmt das Verfahren nach PEARSON (1966) eine metrische Distanz an, was bei gemessenen Elementgehalten ja auch zutreffend ist, aber zugleich eine Normalverteilung postuliert.

Nach dem Spearman-Algorithmus (Tabelle 14) ist Dolomit mit Calcit lediglich mit dem KRK von -0,8 negativ und mit Mg (+0,78) positiv korreliert. Calcit wird mit den leichten SEE signifikant negativ korreliert (bis 0,38 bei Cer). Demgegenüber beträgt nach Pearson (Tabelle 15) der KRK von Dolomit zu Calcit -1 und zu Mg 0,963. Angesichts des geringen Quarzanteils sind die hundertprozentige negative Korre-

lation zwischen Dolomit und Calcit sowie der Mg-Koeffizient sicherlich näher an der Wirklichkeit als nach SPEARMAN (1908) errechnet. Ebenso errechnet Pearson keine signifikante Korrelation mit den leichten SEE, für die es auch keinen mineralogischen Grund gibt.

Somit neigt der Spearman-Algorithmus dazu, reelle hohe Korrelationen abzusenken, und zwar niedrige, aber signifikant bewertete Korrelationen zu erzeugen, die in Wirklichkeit gar nicht bestehen.

Die lognormale Transformation der Messdaten führt zu keiner Verbesserung der nach PEARSON (1966) errechneten Ergebnisse. Zwar konnte fast immer eine Annäherung an die Normalverteilung erzwungen werden (Abbildung 49 unten). Allerdings werden dabei zahlreiche Mess-

werte nahe bei Null ausgeschlossen, ebenso die mit negativem Vorzeichen, so dass z.B. von über 200 Sauerstoffisotopendaten nur zwei Werte übrigblieben. Mehr noch, die ermittelten KRKs verbessern sich keineswegs, im Gegenteil: In Tabelle 16 sind nun Calcit und Dolomit schwächer miteinander negativ korreliert, La sowie Ce hingegen positiv mit Dolomit und Mg. Nun kommt Spearman sogar zu etwas realistischeren KRKs, was hier aber nicht dargestellt wird.

In der Tat erwiesen sich die eingesetzten statistischen Auswertungsverfahren als hinreichend robust gegenüber den Abweichungen von der Normalverteilung, und die häufig geforderte Log-Transformation der Messwerte nicht nur als überflüssig sondern sogar als schädlich.

Spearman-Rho		Quarz XRD	Calcit XRD	Dolomit XRD	Mg Gew%	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Y
Quarz XRD	KRK	1,000	-,200**	-,226**	-,221*	,057	,040	,060	,040	,035	,001	-,006
	Sig-2	.	,009	,003	,017	,515	,648	,509	,661	,722	,993	,944
	N	170	170	170	116	132	132	122	125	108	103	132
Calcit XRD	KRK	-,200**	1,000	-,818**	-,674**	-,282**	-,368**	-,281**	-,256**	-,176	-,153	-,117
	Sig-2	,009	.	,000	,000	,001	,000	,002	,004	,068	,123	,181
	N	170	170	170	116	132	132	122	125	108	103	132
Dolomit XRD	KRK	-,226**	-,818**	1,000	,784**	,225**	,318**	,233**	,218*	,136	,124	,103
	Sig-2	,003	,000	.	,000	,009	,000	,010	,014	,161	,214	,240
	N	170	170	170	116	132	132	122	125	108	103	132
Mg Gew%	KRK	-,221*	-,674**	,784**	1,000	,261**	,233**	,233**	,200**	,156*	,164*	,195**
	Sig-2	,017	,000	,000	.	,000	,000	,000	,002	,027	,027	,002
	N	116	116	116	368	259	258	233	237	201	181	259
La	KRK	,057	-,282**	,225**	,261**	1,000	,882**	,976**	,975**	,946**	,921**	,913**
	Sig-2	,515	,001	,009	,000	.	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	132	132	132	259	284	283	258	262	226	205	284
Ce	KRK	,040	-,368**	,318**	,233**	,882**	1,000	,895**	,887**	,825**	,730**	,715**
	Sig-2	,648	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000	,000
	N	132	132	132	258	283	283	258	262	226	205	283
Pr,Nd,Sm	<i>(ausgelassen)</i>											
Eu	KRK	,001	-,153	,124	,164*	,921**	,730**	,959**	,973**	,986**	1,000	,876**
	Sig-2	,993	,123	,214	,027	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000
	N	103	103	103	181	205	205	204	205	204	205	205
Y	KRK	-,006	-,117	,103	,195**	,913**	,715**	,858**	,882**	,858**	,876**	1,000
	Sig-2	,944	,181	,240	,002	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.
	N	132	132	132	259	284	283	258	262	226	205	284

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig). *Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant

Tabelle 14: Nach SPEARMAN (1908) ermittelte nichtparametrische Korrelationskoeffizienten KRK

Pearson		Quarz XRD	Calcit XRD	Dolomit XRD	Mg Gew%	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Y
Quarz XRD		1	,232**	-,243**	-,205*	,035	,098	,030	,027	,010	,000	-,034
	Sig-2	.	,002	,001	,028	,690	,266	,741	,764	,920	,996	,695
	N	170	170	170	116	132	132	122	125	108	103	132
Calcit XRD	KRK	,232**	1	-,100**	-,963**	-,052	-,121	-,044	-,045	,015	,009	,046
	Sig-2	,002	.	,000	,000	,553	,168	,628	,621	,874	,925	,602
	N	170	170	170	116	132	132	122	125	108	103	132
Dolomit XRD	KRK	-,243**	-,100**	1	,963**	,052	,119	,044	,044	-,016	-,009	-,045
	Sig-2	,001	,000	.	,000	,557	,173	,632	,624	,873	,925	,606
	N	170	170	170	116	132	132	122	125	108	103	132
Mg Gew%	KRK	-,205*	-,963**	,963**	1	,036	,103	,057	,058	,010	,032	-,028
	Sig-2	,028	,000	,000	.	,562	,100	,390	,370	,890	,665	,656
	N	116	116	116	368	259	258	233	237	201	181	259
La	KRK	,035	-,052	,052	,036	1	,815**	,972**	,966**	,921**	,894**	,835**
	Sig-2	,690	,553	,557	,562	.	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	132	132	132	259	284	283	258	262	226	205	284
Ce	KRK	,098	-,121	,119	,103	,815**	1	,850**	,834**	,773**	,698**	,566**
	Sig-2	,266	,168	,173	,100	,000	.	,000	,000	,000	,000	,000
	N	132	132	132	258	283	283	258	262	226	205	283
Pr	KRK	,030	-,044	,044	,057	,972**	,850**	1	,996**	,971**	,942**	,806**
	Sig-2	,741	,628	,632	,390	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000
	N	122	122	122	233	258	258	258	257	225	204	258
Nd	KRK	,027	-,045	,044	,058	,966**	,834**	,996**	1	,985**	,962**	,834**
	Sig-2	,764	,621	,624	,370	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000
	N	125	125	125	237	262	262	257	262	225	205	262
Sm	KRK	,010	,015	-,016	,010	,921**	,773**	,971**	,985**	1	,989**	,843**
	Sig-2	,920	,874	,873	,890	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000
	N	108	108	108	201	226	226	225	225	226	204	226
Eu	KRK	,000	,009	-,009	,032	,894**	,698**	,942**	,962**	,989**	1	,879**
	Sig-2	,996	,925	,925	,665	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000
	N	103	103	103	181	205	205	204	205	204	205	205
Y	KRK	-,034	,046	-,045	-,028	,835**	,566**	,806**	,834**	,843**	,879**	1
	Sig-2	,695	,602	,606	,656	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.
	N	132	132	132	259	284	283	258	262	226	205	284

Tabelle 15: Nach PEARSON (1966) ermittelte metrische Korrelationen

		Lg Dol	Lg Mg	Lg Cc	Lg qz	Lg La	Lg Ce
LgDol	KRK	1	,838**	-,515**	-,322**	,249*	,316**
	Sig-2	.	,000	,000	,001	,027	,005
	N	104	67	104	103	79	79

Tabelle 16: Korrelation nach PEARSON (1966) zwischen logtransformierten Messwerten

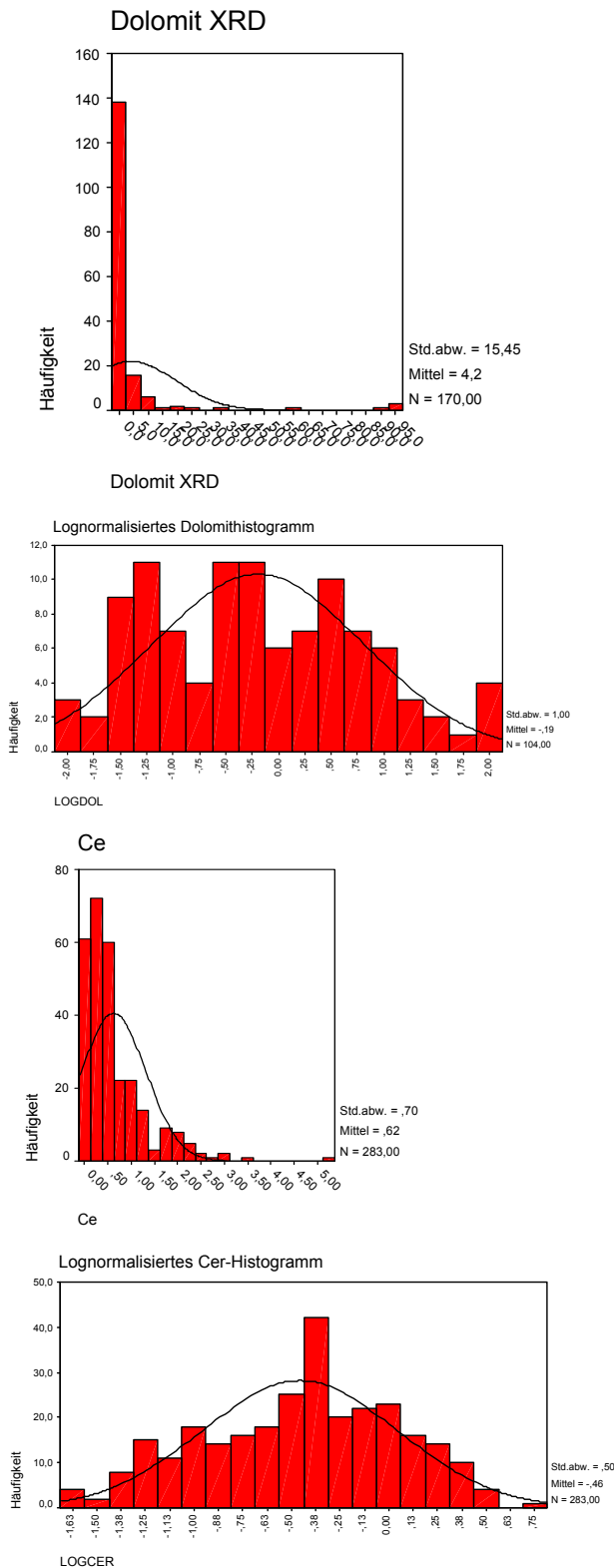


Abbildung 49: Exemplarische Histogramme der unveränderten und lognormalisierten Messwerte von Dolomit und Cer. Eine Annäherung an die Normalverteilung kann erzwungen werden

4.9 Fehlende Werte

Insbesondere bei sehr reinen Marmoren können einige Elementgehalte unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Es wäre jedoch nicht angebracht, diese Messwerte von der Auswertung auszuschließen, da sie ja tatsächlich die Information enthalten, dass die entsprechenden Gehalte gemessen wurden, aber sehr niedrig waren. So sind die niedrigen Manganhalte einer Lagerstätte wie Marmara ein herkunftstypisches Merkmal. Bei den Seltenerdelementen sind insbesondere diejenigen mit ungerader Ordnungszahl betroffen, die nach der Regel von Oddo-Harkins in stellarer Materie gegenüber denen mit gerader Ordnungszahl stark verarmt sind. Einige statistische Prozeduren führen (insbesondere unter SPSS) bei fehlenden Werten zu einem Ausschluss sehr vieler Datensätze. Verschärft wurde diese Problematik noch dadurch, dass wegen störender Einflüsse der vorherrschenden Ca-Matrix in den Lösungen mit sehr hohen Verdünnungen gearbeitet werden musste, und zusätzlich während der langen Messperioden die Empfindlichkeit des ICP-MS-Analysegerätes nachließ.

Um diese sehr geringe Gehalte ausdrückenden Daten nicht auszuschließen, wurde eine zweite Tabelle angelegt, in der bei Mn der Wert der untersten Nachweisgrenze von 2,5 ppm und für die SPSS-Prozeduren bei den SEE ein Zehntel des untersten Messwerts bzw. der Nachweisgrenze (als einziffriger Wert) gesetzt wurde.

4.10 Faktorenanalyse

Mittels der Faktorenanalyse wird bei vielen Messvariablen versucht, diejenigen Faktoren oder Komponenten herauszufinden, deren innere Elemente einerseits eine ähnlich hohe Ladung und damit Gemeinsamkeiten aufweisen, die andererseits aber möglichst unabhängig voneinander sind. Am stabilsten hat sich hier die Hauptkomponentenmethode mit Extraktion bei Eigenwerten >1 , Varimaxrotation und listenweisem Fallausschluss fehlender Werte erwiesen. Letzteres hat jedoch zur Folge, dass bei Hinzufügen neuer Variablen die Zahl der ausgewerteten Fälle kleiner wird, wenn die Variablen nicht in allen Datensätzen vollständig enthalten sind. Wurden bei der ausschließlichen Eingabe der SEE-Werte weißer bis weißgrauer Marmore 179 Fälle 2 Komponenten zugeordnet, die 97% der Gesamtvarianz erklären (davon

89% in Komponente 1), so zeigt Tabelle 17, dass bei Eingabe zusätzlicher Variablen (Quarz, Dolomit, Calcit aus XRD, Mg, Sr, Mn, Fe, δO , δC) nur noch 66 Fälle übrigblieben, die auf 4 Komponenten verteilt 85% der Gesamtvarianz erklären. Die Bedeutung der Faktorladungen mit Werten zwischen +1 und -1 wird in der hier benutzten rotierten Komponentenmatrix deutlicher und leichter interpretierbar als in der auf zwei Komponenten reduzierten Abbildung 50.

	Rotierte Komponentenmatrix Komponente			
	1	2	3	4
La	,855	,176	,300	-,003
Ce	,543	,236	,703	-,043
Pr	,849	,182	,424	,023
Nd	,874	,170	,408	,015
Sm	,902	,109	,373	-,003
Eu	,943	,071	,284	-,016
Gd	,975	,037	,171	-,025
Tb	,978	,025	,142	-,035
Dy	,985	,018	,087	-,025
Y	,975	-,027	-,105	,010
Ho	,989	,009	,029	-,017
Er	,991	,014	,012	-,015
Tm	,983	,036	-,003	-,012
Yb	,983	,052	-,013	-,030
Lu	,974	,056	-,025	-,042
Mg Gew%	,065	,968	,114	,034
Dolomit XRD	,067	,979	,093	-,036
Calcit XRD	-,066	-,977	-,100	,042
Fe (OES)	,036	,325	,803	,028
Mn (OES)	,120	-,013	,584	,037
Sr	-,175	-,154	,210	,753
Quarz XRD	-,080	-,333	,446	-,412
δO	-,315	-,061	-,230	-,405
δC	-,105	,020	-,265	,687

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.
Die Rotation ist in 5 Iterationen konvergiert

Tabelle 17: Rotierte Komponentenmatrix aus der Faktorenanalyse (SPSS)

In Komponente 1 weisen die SEE die höchste Ladung mit fast identischen Werten über 0,9 auf. Dies zeigt, wie stark sie untereinander korreliert sind und macht sich in den sehr ähnlichen Verteilungsmustern der SEE-Absolutgehalte bemerkbar. Die sehr geringen Ladungen der anderen Variablen deuten an, dass die SEE tatsächlich die Sedimentationsgeschichte widerspiegeln, ohne durch spätere Metamorphoseprozesse wesentlich beeinflusst

worden zu sein. Mit einer bedeutsamen Ausnahme: Die leichten SEE zeigen geringere Ladungen in Komponente 1 und etwas höhere in Komponente 3. Insbesondere die Ladung von Cer ist in dieser Komponente am höchsten, ebenso die von Fe, Mn und Quarz. Diese Komponente repräsentiert quasi die Folgen der Kontamination des marinen Protolithen durch Eintrag von kontinentalem Detritus in das marine Milieu, der die leichten SEE und insbesondere das Cer beeinflusst. Wie im Kapitel 4.6.2 über die SEE schon erläutert, wird die in reinem Meerwasser ausgeprägte negative Cer-Anomalie (normiert auf PAAS) durch Fe und Mn an Durchschnittswerte pelagischer Sedimente angeglichen.

Komponente 2 repräsentiert die miteinander stark positiv korrelierten Mg- und Dolomitgehalte und deren – bei fast identischem Wert – negative Korrelation mit Calcit. Die geringe und fast gleichmäßige Verteilung der Sauerstoffisotopie δO auf alle vier Komponenten deutet darauf hin, dass sie durch keine der betrachteten Variablen wesentlich beeinflusst wird. Demgegenüber zeigt die hohe Ladung von Sr und δC in der Komponente 4, dass zwischen Kohlenstoffisotopie und Sr-Gehalten ein Zusammenhang besteht. Hohe Salinität und Sr-Gehalte im marinen Bildungsmilieu der Kalksteine sind mit einer Anreicherung schwererer Kohlenstoffisotope im Ausgangsgestein verknüpft. Besonders deutlich zeigt sich dies in der negativen linearen Korrelation von $\delta^{13}\text{C}$ mit Fe/Sr, wie sie z.B. bei parischen Lychnites auftritt (Abbildung 47).

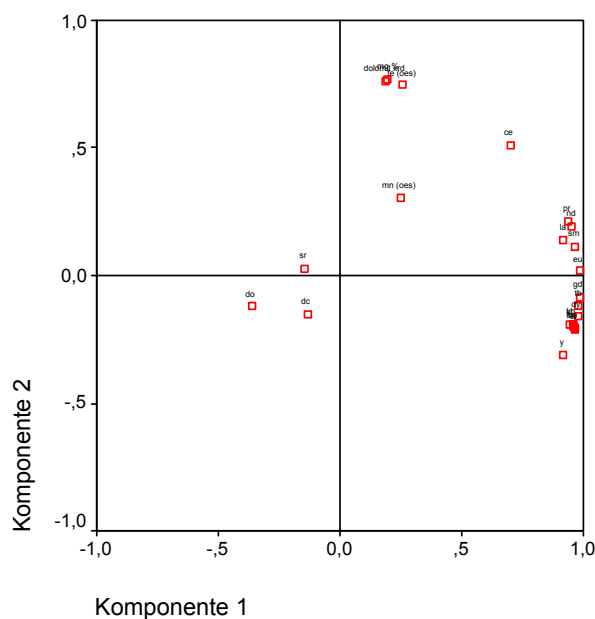


Abbildung 50: Komponentendiagramm aus der Faktorenanalyse

	Komponente			
	1	2	3	4
La	,877	,224	,159	,033
Ce	,585	,723	,171	,040
Pr	,879	,359	,155	,078
Nd	,904	,334	,147	,071
Sm	,930	,293	,089	,052
Eu	,963	,211	,056	,024
Gd	,984	,110	,026	-,005
Tb	,985	,087	,014	-,019
Dy	,987	,035	,011	-,021
Y	,964	-,178	-,012	-,018
Ho	,987	-,025	,007	-,023
Er	,987	-,045	,015	-,024
Tm	,978	-,056	,037	-,026
Yb	,978	-,065	,054	-,045
Lu	,969	-,079	,059	-,059
Mg Gew%	,078	,151	,962	,029
Dolomit XRD	,077	,152	,967	-,045
Calcit XRD	-,077	-,158	-,964	,049
Fe (OES)	,092	,807	,282	,122
Mn (OES)	,186	,392	-,002	,188
Sr	-,159	,076	-,141	,797
Quarz XRD	-,027	,333	-,355	-,264
δO	-,325	-,142	-,063	-,412
δC	-,127	-,346	,077	,642
Y/Ho (mol)	-,330	-,780	-,051	,027
ΣSEE/Y	-,132	,895	,043	-,102
Cer _{neg} PAAS (LaCePr)	-,335	,760	-,064	-,113
Fe/Sr	,088	,769	,460	-,205

Tabelle 18: Nur geringe Veränderung der Faktorenladung bei Einfügung abgeleiteter Elementverhältnisse

Werden zusätzlich aus den vorherigen Variablen abgeleitete Elementenverhältnisse (Y/Ho (mol), Σ SEE/Y, Cer_{neg} und Fe/Sr) eingefügt, so ändert sich das Bild, das nun bei wiederum 66 Fällen 86% der Gesamtvarianz erklärt, nur unwesentlich: insbesondere werden Mn und Quarz in einer 5. Komponente gruppiert. Bei Erzwingung von 4 Komponenten entsteht die in Tabelle 18 dargestellte rotierte Komponentenmatrix, die allerdings nur knapp 83 % der Gesamtvarianz erklärt: Fe, Mn, Cer und eingeschränkt Quarz (der wie auch tatsächlich beobachtbar leicht negativ mit Dolomit korreliert ist) gehören der gleichen Komponente an, in der auch die abgeleiteten Elementverhältnisse mit hohen Ladungen vertreten sind.

Insgesamt bestätigt die Faktorenanalyse die geowissenschaftlich begründete Nützlichkeit verschiedener eingesetzter Merkmale und Merkmalskombinationen (wie der negativen Cer-Anomalie) zur Marmorprovenienzbestimmung.

4.11 Elektronenspinresonanzspektroskopie (ESR) und Kathodolumineszenzanalyse (KL)

An Fragmenten des gleichen Probenmaterials wurden von Professor Klaus Ramseyer und Dr. Daniele Decrouez (RAMSEYER *et al.* 1992) in Bern KL-basierte (s. Kapitel 3.2.5), und von Dr. Donato Attanasio (ATTANASIO 2003) in Rom sowie Professor Yannis Maniatis und Dr. Kiki Polikreti (MANIATIS & POLIKRETI 2001) in Athen ESR-basierte Untersuchungen (s. Kapitel 3.2.4) vorgenommen. Ihre sowie die eigenen Zuordnungsergebnisse sind in Tabelle 19 vergleichend dargestellt. Alle drei Laboratorien bestätigen insbesondere die prokonnesische Herkunft der Pergamonaltarproben.

Bei beiden Verfahren werden immer zusätzliche Parameter herangezogen. Bei der ESR-Bestimmung wurden mehr Variablen verwendet und die Proben mit Hilfe der Diskriminanzanalyse durch das Programm STATISTICA zugeordnet. Leider teilten die Labors die Gewichtung der einzelnen Variablen nicht mit. Auffällig ist die starke Häufung fast aller prokonnesischen Proben in einem engbegrenzten Feld. In beiden Analysen trat zunächst eine Überlappung der Altarproben mit weiteren Feldern auf, insbesondere dem von Paros. Diese konnten jedoch nach zusätzlichen

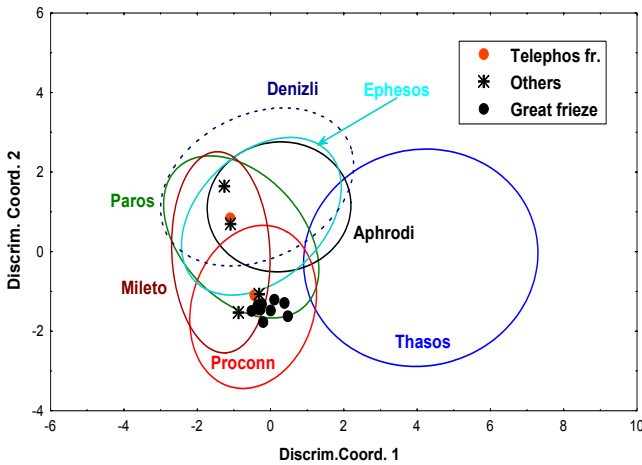


Abbildung 51: Auswertung von ESR-Spektren (4 ESR-Variablen) und 4 morphologischen Variablen (MGS, COLOUR, ODOUR, STDCOL) untersuchter Marmore mittels Diskriminanzanalyse. Analyse und Diagramm von D. Attanasio (2002)

Untersuchungen ausgeschlossen werden. Attanasio (Abbildung 51) unternahm sogar den – hier nicht dargestellten – Versuch, die Proben verschiedenen Bruchgebieten auf Marmara zuzuordnen. Bei Maniatis und Polikreti erfolgte die Abgrenzung insbesondere aufgrund der Auswirkungen der höheren Mn-Gehalte bei Paros (Abbildung 52 oben). Sie unterscheiden auch ein Prokonnesos-Feld 1 und 2. Diese dürften jedoch nicht mit den durch die unterschiedliche Isotopie definierten Feldern identisch sein. Fast alle prokonnesischen Proben einschließlich derer mit negativerer Sauerstoffisotopie fallen in deren Proc-2-Feld, alleine die Ephesos-Hafenthermenprobe in das Proc-1-Feld. Die relativ grobkörnige im Ephesos- und Naxos-Feld liegende Akkaya-Probe wurde Ephesos zugeordnet.

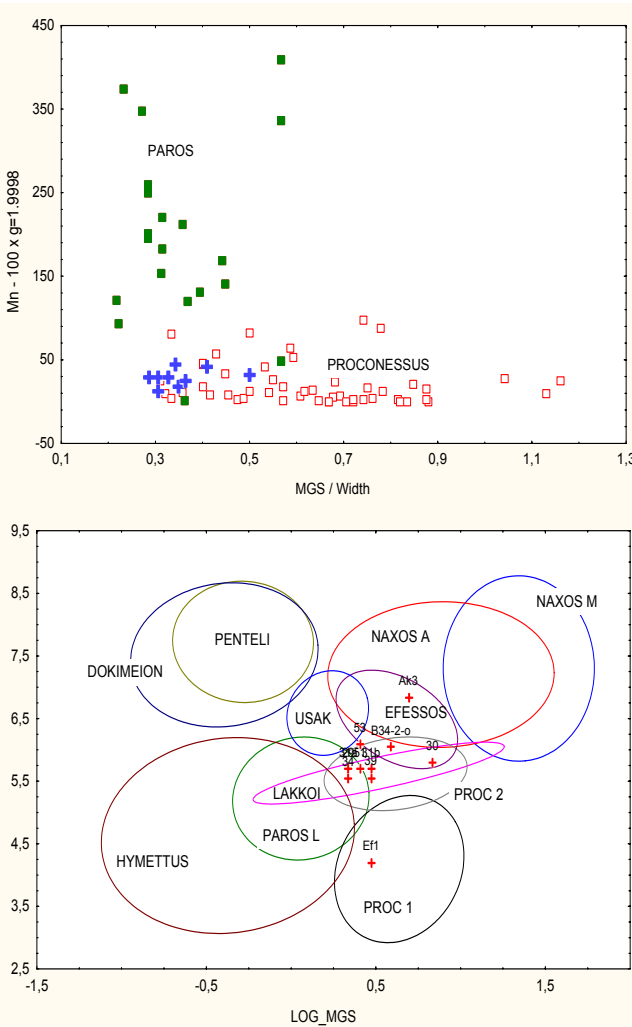


Abbildung 52: Zuordnungsdiagramme der Marmorproben meist prokonnesischer Herkunft (blaue Kreuze oben) durch Y. Maniatis & K. Polikreti (2003). Der Y-Achsenabschnitt in der unteren Abbildung repräsentiert eine nicht näher erläuterte Diskriminanzfunktion

Für die **KL-Analyse** wurden die von polierten Dickschliffen angefertigten Photographien (s. Abbildung 53 - Abbildung 67) mit Referenzabbildungen sowie C/O-Isotopiefeldern von Lagerstätten in der Datenbank der Arbeitsgruppe Ramseyer verglichen. Alle von uns als prokonnesisch definierten Marmore zeigen ein sehr ähnliches KL-Muster mit braun-rotten bis orangen Farben schwacher Intensität. Nur die Probe der Hafenthermen aus Ephesos (Kapitel 7.9) weist bei noch geringerer Intensität einen Blauschimmer auf. Sie ist recht akzessorienreich (Quarz, Glimmer), was sich auch in einem höherem Fe- und Mg-Gehalt sowie einer relativen Erhöhung von Cer (Verschwinden der negativen Cer-Anomalie) und Verringerung von Y niederschlägt.

Auf die Frage, warum die orangefarbene KL-Mikrofazies als prokonnesisch angesprochen werden, obwohl diese in der Literatur doch als bläulich beschrieben sind, erklärte Frau Dr. Decrouez (persönl. Mitteilung 2003), dass erst in neuerer Zeit mehr prokonnesisches Probenmaterial mit diesem rötlichen Farbton untersucht werden konnte. Sowohl den bläulichen als auch den rötlichen Kathodomikrofazies sei jedoch die schwache Intensität gemeinsam.

Für die endgültige Zuordnung zu Prokonnesos dienten zusätzlich die Isotopiedaten. Da jedoch das Isotopenfeld PR-2 mit den negativeren δO -Werten in der Datenbank der Arbeitsgruppe Ramseyer nicht erfasst war, wurden diese Proben zunächst nicht als prokonnesisch eingeord-

net. Deshalb sind diese in der KL-Zuordnungsspalte in Klammern als PR-2 angegeben, die auf Anrieb als prokonnesisch definierten mit PR-1. Für die Probe HarLn (Abbildung 53) mit einer gelb-rot-braunen Farbe bei starker Intensität wurde eine pentelische Herkunft für möglich gehalten. Natürlich konnte die Akkaya-Probe (Abbildung 67) von niemandem zugeordnet werden, da sie aufgrund ihrer Seltenheit in keiner Datenbank enthalten sein dürfte. Sie zeigt ein komplett anderes Muster mit intensiver Hervorhebung der Korngrenzen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl mittels ESR als auch KL die prokonnesische Herkunft der meisten von uns als prokonnesisch definierten Proben bestätigt wird. Die starken Überlappungen der kleinasiatischen Marmore sowie die im Vergleich zu den einheitlichen und gut dokumentierten prokonnesischen Marmoren nicht sehr umfangreichen Datenbanken schlossen jedoch eine intensivere Inanspruchnahme der mit diesen Verfahren vertrauten Labors aus.

PNr	Herkunft	KL		EPR		Eigen	$\delta^{18}\text{O}$
		Mikrofazies	ZO	Man	Attan	ZO	
29	GF-11 = Großer Fries, Platte 11	Homogène, brun-rouge, faible intensité	PR-1	PR-2	PR	PR-1	-3,4
30	GF-92	légèrement hétérogène, brun-rouge, faible intensité	(PR-2)	PR-2	PR	PR-2	- 10,92
31	GF93	légèrement hétérogène, brun-rouge, faible intensité	(PR-2)	PR-2	PR	PR-2	-4,46
32	GF-97	homogène, brun-rose, faible intensité	PR-1	-	PR	PR-1	- 3,03/ -3,18
34	GF-106	légèrement hétérogène, brun-rouge, faible intensité	PR-1	PR-2	PR	PR-1	-0,4
39	GF-110	légèrement hétérogène, brun-rose à brun-rouge, faible intensité	PR-1	PR-2	PR	PR-1	-0,93
42	GF-111	homogène, brun rouge, faible intensité	PR-1	-	PR	PR-1	-0,75
51	GF-117	légèrement hétérogène, brun-rouge, faible intensité	PR-1	PR-2	PR	PR-1	- 1,97/ -1,85
53	GF-118	légèrement hétérogène, brun-rouge, faible intensité	PR-1	PR-2	PR	PR-1	- 1,11/ -5,3
B1-10	TF-1 = Telephos Fries Platte 1	homogène, brun-orange, faible intensité	(PR-2)	-	Milet (Paros)	PR-2	- 11,70
B34-2- o	TF-34	homogène, brun-rouge, faible intensité	PR-1	PR-2	PR/ Paros	PR-1	-3,20
Ef-1	Ephesos Hafentherme	légèrement hétérogène, brun-rose, très faible intensité	PR-1	PR-1	PR	PR-1	- 2,59/ -2,13
HARLn	London	hétérogène, jaune à brun- rouge, forte intensité	Pent	-	Denizli (Mi)	Pent	-4,90
Ak3	Akkaya N-Bergama Kozak	hétérogène, zonation, jaune à brun- rouge, forte intensité	?	EF	Milet (Eph)	Akkaya	- 12,30

Tabelle 19: Probenzuordnung mittel KL (Ramseyer & Decrouez 2003) und EPR (Attanasio 2002 und Maniatis & Polikreti 2003)

4.11.1 Kathodolumineszenz-Bildtafel

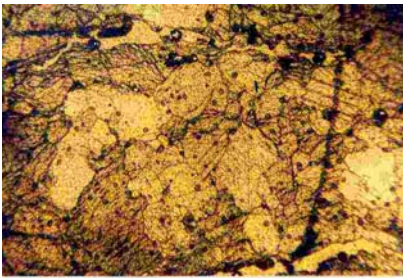


Abbildung 53: KL-Penteli

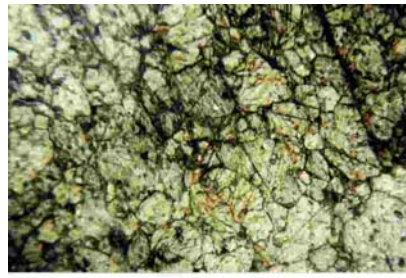


Abbildung 56: KL-GF 93 b

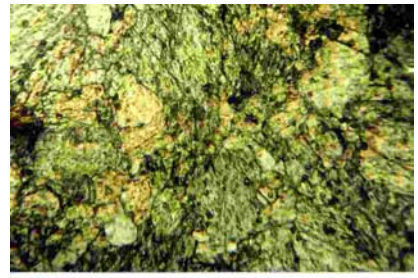


Abbildung 59: KL GF 110

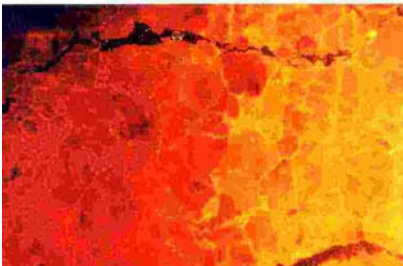


Abbildung 54: KL GF 97

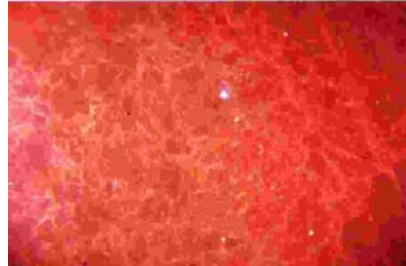


Abbildung 57: KL GF 92



Abbildung 60: KL GF 111

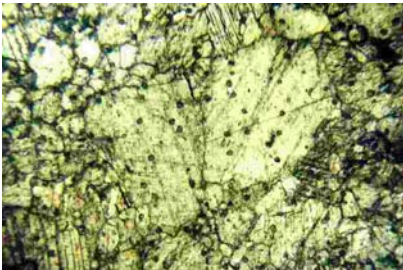


Abbildung 55: KL GF 93a

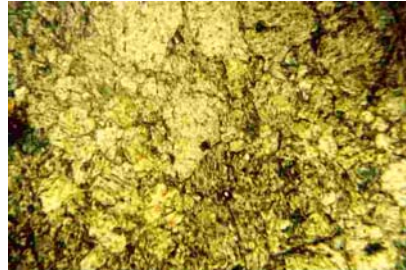


Abbildung 58: KL GF 11

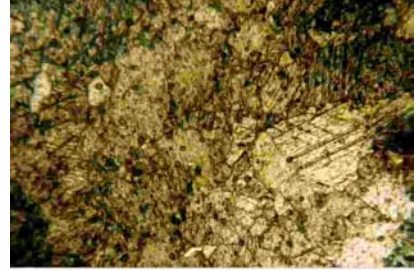


Abbildung 61: KL GF 117



Abbildung 54: KL GF 97



Abbildung 57: KL GF 92



Abbildung 60: KL GF 111

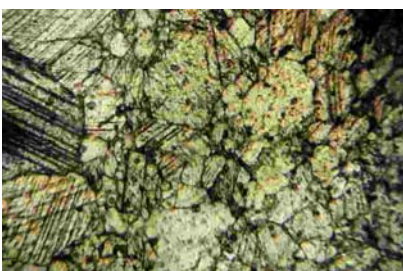


Abbildung 55: KL GF 93a

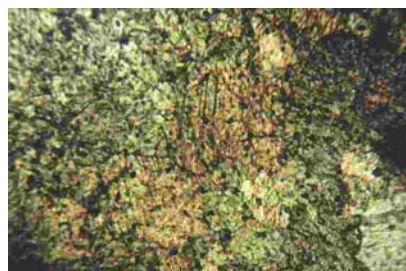


Abbildung 58: KL GF 11

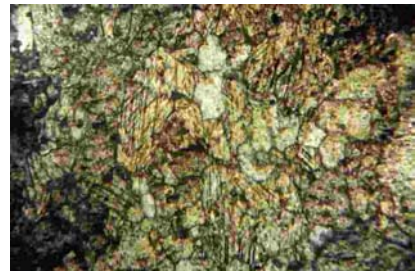


Abbildung 61: KL GF 117

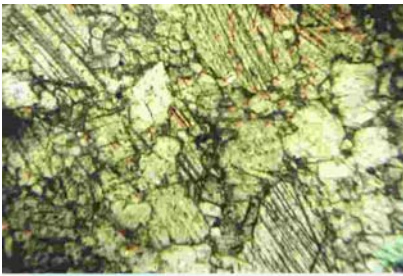


Abbildung 62: KL GF 118

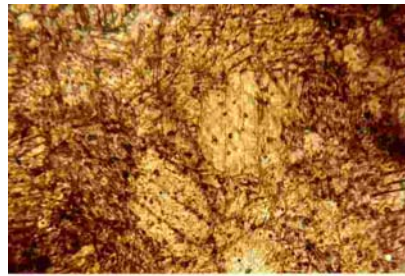


Abbildung 64: KL Ephesos Hafentherme

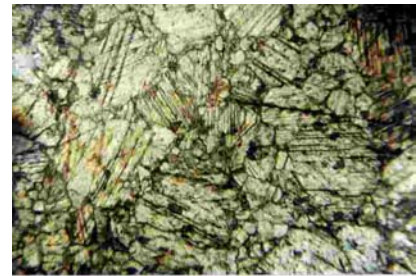


Abbildung 66: KL TF 34

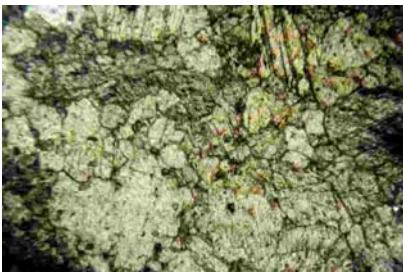


Abbildung 63: KL GF 108

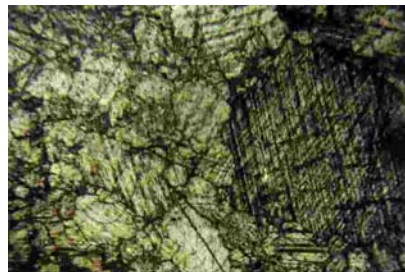


Abbildung 65: KL TF 1

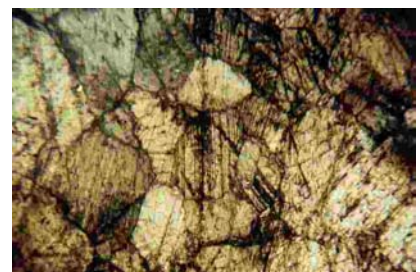


Abbildung 67: KL Akkaya 3

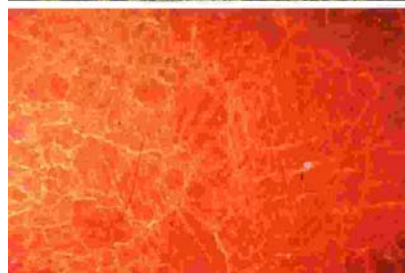


Abbildung 68: Aufnahmen von Kathodolumineszenzmikrofazies antiker Marmore, Erklärung s. S. 86; die oberen Aufnahmen sind die korrespondierenden Dickschliffaufnahmen in polarisiertem Licht bei gekreuzten Nicols, kurze Bildkante 2,9 mm

4.12 Geruchsbestimmung, Gaschromatographie

Schon die Anwesenheit von graphitischen Partikeln und Eisensulfiden (Abbildung 69) deuten an, dass die während der Karbonatsedimentation eingeschlossenen organischen Substanzen ihre Spuren hinterlassen haben, auch wenn die Marmore ihres Fossilgehaltes verlustig gegangen sind. Manche Marmore (z.B. von Marmara, Hymettos, Thasos-Aliki) strömen bei mechanischer Zerstörung bereits weniger Körner zudem einen charakteristischen Geruch nach Schwefelwasserstoff o.ä. aus. Der Verdacht, dass hieran auch organische Substanzen beteiligt sein könnten, liegt nahe.



Abbildung 69: Auflichtaufnahme von prokonnesischem Marmor mit größtenteils in Magnetit (0,8 mm lang) umgewandeltem Eisensulfidkorn

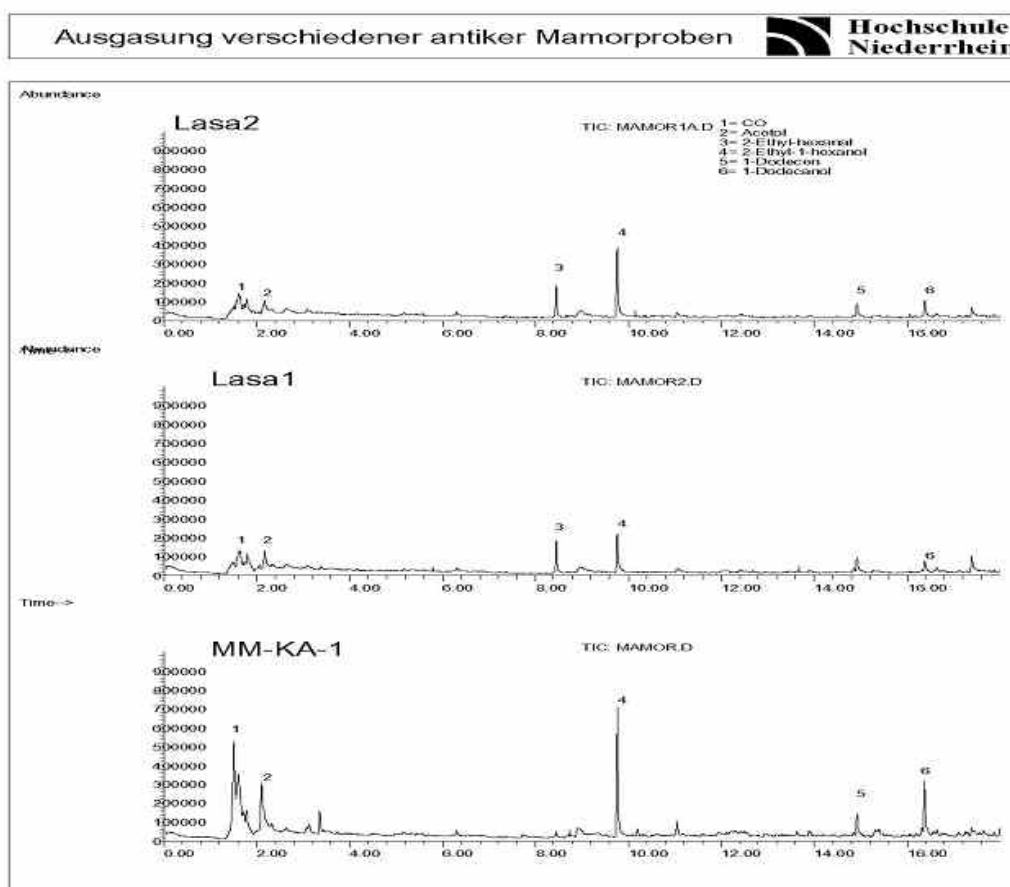


Abbildung 70: Gaschromatographische Untersuchung volatiler Phasen nach Thermo-Extraktion. 1: CO, 2: Acetol, 3: 2-Ethyl-Hexanal, 4: 2-Ethyl-1-hexanol, 5: 1-Dodecen, 6: 1-Dodecanol

Um herauszufinden, welche gasförmigen Verbindungen hierfür verantwortlich sind und ob sie neben der allgemeinen Beschreibung der Präsenz von Geruch als zusätzliche Herkunftsindikatoren herangezogen werden können, wurden einige Proben an der Hochschule Niederrhein (Krefeld) von Prof. Juergen Schram gaschromatographisch untersucht. Die Hauptschwierigkeit besteht in der möglichst verlust-

freien Extraktion der Gasphasen aus dem festen Gestein und seine Überführung in ein geeignetes Lösungsmedium. Die Proben wurden mittels des Thermoextraktionsverfahrens behandelt und anschließend gaschromatographisch untersucht (Abbildung 70). Leider liegen bisher nur wenige reproduzierbare Messergebnisse vor. Zwei weiße Marmorproben von Lasa zeigen übereinstimmende, niedrige Gehalte an CO und

Kohlenwasserstoffen. Demgegenüber weist eine dunklere Marmorprobe von Marmara (Koyüste Altıntaş) wesentlich höhere Gehalte dieser Verbindungen sowie weitere Molekülgruppen auf. Zwar sind diese (meist Alkohole) nicht unmittelbar für den Geruch verantwortlich. Aber es bestätigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem höheren Anteil organogener Residuen in den dunkleren Marmoren und höheren Anteilen volatiler Phasen. Zudem ist zumindest das gaschromatographische Merkmalsmuster der beiden Lasa-Proben identisch und zugleich so verschieden von der Marmara-Probe, dass die zukünftige Verwendbarkeit dieser Methode für die Herkunftsbestimmung nicht ausgeschlossen werden kann.

Mit dem Ziel, einen Anhaltspunkt für die Geruchsursachen zu finden, war bereits (LAZZARINI & MARIOTTINI 1987) nassanalytisch (BaSO_4 -Ausfällung) ein Schwefelgehalt für gebänderten prokonnesischen Marmor von 0,1 Gew% ermittelt worden, für einen gebänderten thasischen Marmor hingegen nur 0,014 Gew%. Wahrscheinlich sind hierbei jedoch vor allem akzessorische Pyrite aufgelöst worden.

Erklärungsversuch der Geruchsbildung

Die obige Auflichtaufnahme von einem prokonnesischen Marmor (Abbildung 69) zeigt ein fast vollständig in Magnetit umgewandeltes Fe-Sulfidkorn⁴⁶. Diese Erscheinung, die graphitischen Einschlüsse, der charakteristische Geruch und die gaschromatographischen Ergebnisse zusammengenommen, erlauben vereinfachend folgende Vorgänge während der Marmorgenese anzunehmen: Der Sauerstoffpartialdruck reichte nicht aus, um die im Karbonatsediment eingeschlossenen organischen Komponenten chemisch und/oder mikrobiotisch während und nach der Diagenese vollständig zu oxidieren. Ähnlich wie bei Inkohlungsprozessen wurden die langkettigen Kohlenwasserstoffe organischer Substanzen aufgebrochen und dabei Wasserstoff abgespalten, wobei sich auch kurzkettigere Kohlenwasserstoffverbindungen neu bildeten. Das offene Porenvolumen war so gering, dass nur ein Teil der volatilen Phasen entweichen konnte – ein Phänomen, das sich heute in

⁴⁶ Die Kornform spricht eher für ursprünglichen Markasit statt Pyrit, jedoch ließ sich in dem sulfidischen Rest Reflexionspleochroismus nicht eindeutig erkennen.

jedem Faulschlamm am Strand beobachten lässt. Ein großer Teil des – wahrscheinlich aus tierischen Eiweißverbindungen herrührenden – Schwefels verband sich mit Fe zu Pyrit, ein anderer Teil zu Organo-Schwefelverbindungen und Schwefelwasserstoff. Die Hauptmenge der flüchtigen Phasen blieb in mikroskopisch bis submikroskopisch kleinen Poren bzw. Flüssigkeitseinschlüssen eingefangen. Frühere Infrarot- und Ramanspektren-Analysen (CRAMER 1998, S. 154-55) konnten in ihnen keinen Schwefelwasserstoff (H_2S) nachweisen, ebenso wenig die bisherigen gaschromatographischen Untersuchungen. Dies mag der Tatsache geschuldet sein, dass H_2S -Geruch bereits bei 0,02 ppm deutlich wahrgenommen werden kann (GREENWOOD & EARNSHAW 1999), was unterhalb der Nachweisgrenze instrumenteller Analytik liegt.

Die gaschromatographischen Untersuchungen zeigen jedoch bei einer gebänderten prokonnesischen Marmorprobe gegenüber weißen Lasa-Marmoren deutlich erhöhte Anteile flüchtiger organischer Verbindungen (u.a. Alkohole). Bei der früheren Untersuchung der Mikroporen wurden zudem ein- und zweiphasige Einschlüsse beobachtet, wobei die kryometrisch ermittelte Homogenisierungstemperatur von -20°C und das Ausfällen kubischer Kristallite auf hochsalinäre NaCl-Phasen hinweisen. Nicht sicher eingeschätzt werden kann, wieweit die geruchsbildenden volatilen Komponenten in diesen Mikroporen eingeschlossen sind, oder in Mikrorissen bzw. dem feinverzahnten Korngrenzensystem. Der Sauerstoffpartialdruck reichte im weiteren Verlauf der Gesteinsentwicklung zwar aus, einen Teil des Pyrits zu Magnetit⁴⁷ zu oxidieren, aber nur selten zur Entstehung dreiwertiger Eisenoxide (Hämatit, Limonit etc.). Zugleich waren die Druck / Temperaturbedingungen während der Metamorphose hinreichend hoch, um einen Teil der organogenen Einschlüsse bei der Bildung der prokonnesischen Marmore in Graphit umzuwandeln (s. Kapitel 6.1.2).

⁴⁷ Grundsätzlich ist auch die Reduktion von Magnetit zu Pyrit denkbar, wie sie z.B. bei mikrobiotischen Zersetzungsprozessen organischen Materials während der Diagenese auftreten kann (z.B. HILGENFELDT 2000). Die Form des Sulfideinschlusses in der Auflichtaufnahme spricht jedoch dafür, dass er einen Rest und keine beginnende Neubildung darstellt.

5 Herkunftsrelevante Merkmalsbündel der untersuchten Marmore

5.1 Geochemische Eigenschaften

		N, Anzahl Messwerte	Min	Max	Median	Mittelwert	Std.abw	Varianz	Schiefe	Kurtosis	Kalksteine Mittelwert
Quarz	XRD	170	0,0	1,63	0,27	0,30	0,19	0,04	4	27	2,4
Dolomit	XRD	170	0,0	96,43	0,06	4,2	15	240	5	27	
Mg	Gew%*	368	0,018	12,33	0,3	0,64	1,4	2	6	43	2,6
Fe*		368	6,069	1593	70	149	235	55000	4	20	14600
Mn*		368	2,5	514	10	20	35	1200	9	113	700
Sr	(ICP-OES)*	369	7,8	1451	127	140	92	8500	8	110	450
Sr	(ICP-MS)	284	32,5	1224	143,8	162	106	11000	5	39	450
La		284	0,022	6,39	0,59	0,84	0,9	1	2	6	
Ce		283	0,021	5,17	0,39	0,62	0,7	0,5	2	8	
ΣSEE		284	0,046	22	2,3	3,04	3	10	2	5	
Y		284	0,025	11	1,5	1,98	2	4	2	4	
Ba**		264	0,208	135	1,3	2,87	11	130	1 1	118	120
Pb**		261	0,121	34	1	1,86	3	11	7	56	9
Th**		156	0,004	0,42	0,03	0,06	0,08	0,006	2	5	
U**		246	0,006	1,68	0,04	0,09	0,16	0,03	6	43	2,1
Zn*		218	2,0	106	6	7,3	8	64	9	108	

* Einschließlich früherer Messungen (GERMANN 1988), ** nur indikativ

Tabelle 20: Statistische Parameter geochemisch-mineralogischer Werte aller weißen bis weißgrauen Marmore. Rechte Spalte Mittelwerte Kalksteine (WEDEPOHL 1970). Um den Abstand zwischen Median und Mittelwert nicht zu verkleinern, wurde auf Rundungen weitgehend verzichtet. Alle Angaben außer Quarz, Dolomit und Mg in ppm

Wie bereits in Kapitel 4.8 beschrieben, machen sich die sehr geringen Elementgehalte der meisten Marmore in einer ausgeprägt linksseitigen Abweichung von der Gauß'schen Normalverteilungskurve bemerkbar. Deshalb liegt ihr Median (Wert in der Mitte aller Messdaten) fast immer weit unterhalb des Mittelwerts (Summe aller Messwerte geteilt durch ihre Anzahl). Die sehr starken Standardabweichungen und Varianzen bedeuten aber nicht, dass die geochemischen Analysen wertlos sind. Im Gegenteil, nur aufgrund der hohen Abweichungen der Messergebnisse sämtlicher Marmorproben besteht überhaupt eine Chance, lagerstättenspezifische Elementgehalte zu detektieren.

Dies verdeutlicht die untenstehende Diagrammserie (Abbildung 72 a-n), in der Boxplots mit Mittelwert, Interquartilsbereich und Standardabweichung verschiedener Lagerstättenmarmore dargestellt sind. Es ist erkennbar, dass manche Elementgehalte deutlich unterschiedliche

Bereiche bei verschiedenen Lagerstätten belegen und tendenziell zumindest bei einigen Lagerstätten eine symmetrischere Verteilung auftritt.

Jedoch muss vor zu großem Optimismus gewarnt werden, dass hiermit das alleinige Mittel zur Lagerstättendiskriminierung gefunden wäre. Tatsächlich idealisieren die Boxplots die wirklichen Verhältnisse, weshalb sie nur indikativ und ergänzend verwendet werden dürfen:

1. Von einigen Marmorlagerstätten liegen nur sehr wenige Messwerte vor, wie in der unteren Zeile der Boxplots die Zahl N der durchgeführten Messungen verdeutlicht. Diese unterschiedliche und teilweise zu geringe Probenzahl ist auch ein Hauptgrund, warum hier multivariate statistische Verfahren wie Cluster- und Diskriminanzanalyse für eine primäre Herkunftsbestimmung nicht geeignet waren. Es ging aber angesichts be-

grenzter Ressourcen darum, von einer möglichst großen Zahl von Lagerstätten und Museumsobjekten einigermaßen aussagekräftige Messwerte zu erhalten, statt von einigen wenigen möglichst viele.

2. Zur Bewahrung der Übersichtlichkeit werden nicht alle Lagerstätten dargestellt, ebenso wie statistische Ausreißer und Extremwerte weggelassen werden.
3. Zur Erhöhung der Anzahl von Messwerten wurden die antiken Objekte im Anschluss an ihre Lagerstättenzuordnung in den Datensatz der Lagerstättenmarmore aufgenommen. Dass dies seine Berechtigung hat, wird z.B. im Boxplot der Fe/Sr-Verhältnisse prokonnesischer und parischer Marmore deutlich (Abbildung 71). Die 53 Proben vom Pergamonaltar decken sich gut mit den 25 Proben von Marmara. Die höhere Spannweite der 6 anderen prokonnesischen Proben aus Pergamon wird vor allem durch die akzessorienreicheren ephesischen Hafenthermenproben hervorgerufen, die aber petrographisch und isotopisch (sowie mittels KL und EPR) eindeutig Marmara zugeordnet werden konnten.

Sehr ausgeprägt ist hingegen der Unterschied aller prokonnesischen Proben zu denen der Paros-2-Brüche. Auch sonst hat sich gezeigt, dass Elementverhältnisse wie Fe/Sr oder $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ oftmals eine deutlichere Separierung der Lagerstättenmarmore als die reinen Einzelementgehalte erlauben.

In den folgenden Abbildungen stehen die Abkürzungen in alphabetischer Reihenfolge für die im Kapitel 6 detailliert beschriebenen Marmorlagerstätten:

Afro: Aphrodisias, **BGaq:** antike Brüche bei Stratonikeia, **Eurom:** Euromos, **Hk:** Herakleia, **MTO:** Milet Ost, **MTW:** Milet West, **BGBuAd:** NW-Ufer Bafa See Burgass Adasi, **Car:** Carrara, **Eph:** Ephesos, **Hym:** Hymettos, **MgLS:** Magnesia Lagerstätte, **Milas:** Milas, **Mm:** Marmara-Prokonnesos, **MyLS_28:** Lagerstätte 28 bei Myus, **NB_Ak:** Akkaya nördlich Bergama, **NB_EM:** Eski Maden nördlich Bergama, **Nx:** Naxos, **ParLy:** Paros östliches Marmortal, **ParPy:** Paros Pythion, **ParMarat:** Paros Marathi, **Pent:** Penteli, **PriLS:** Priene Steinbruch, **ThaAl:** Thasos-Aliki, **Phourni:** Phourni-Insel, **Wuns:** Wunsiedel

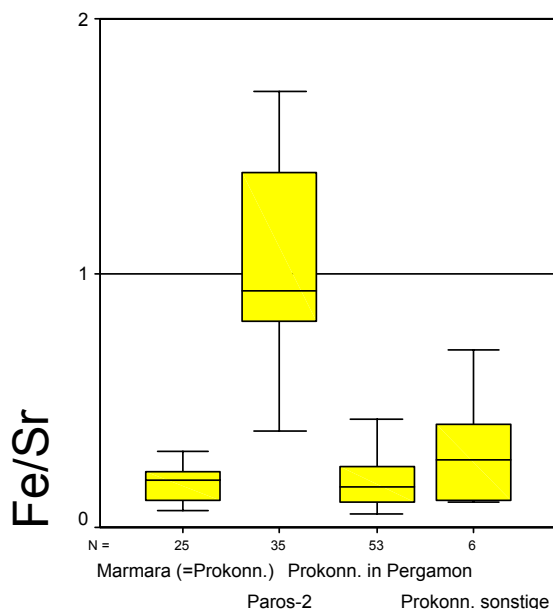
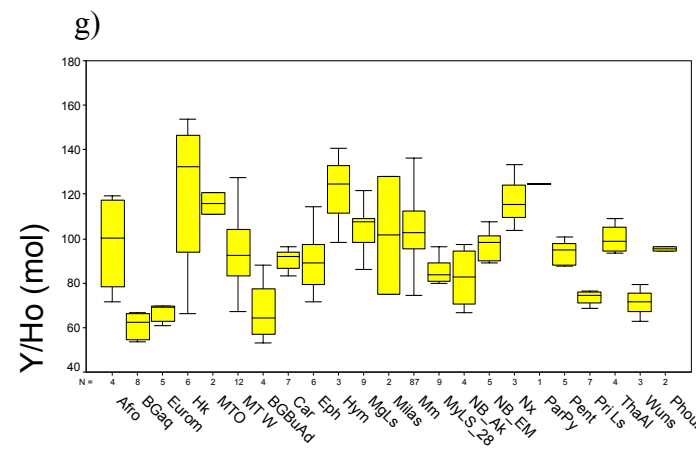
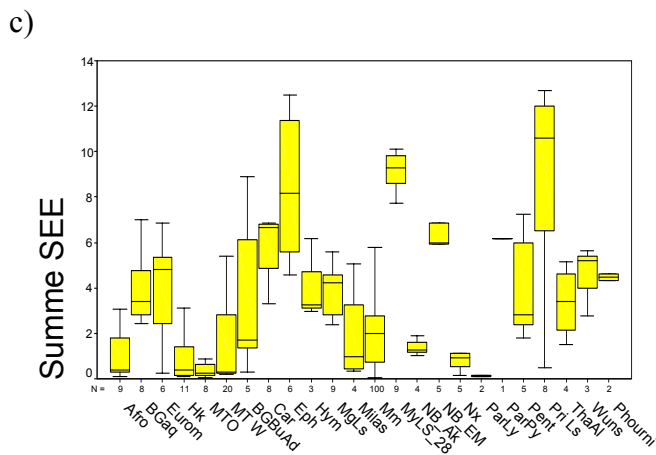
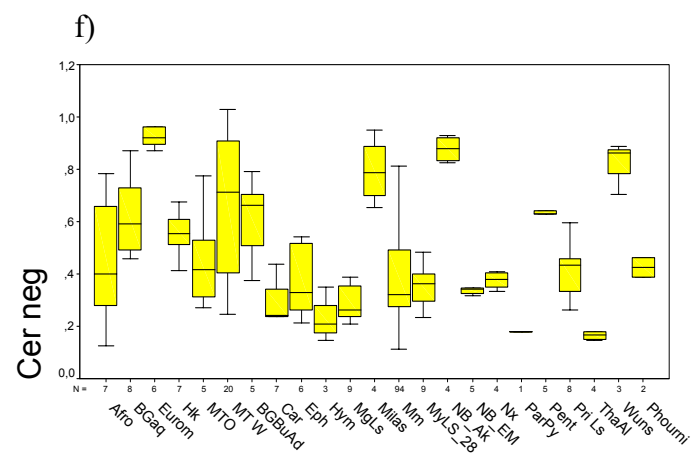
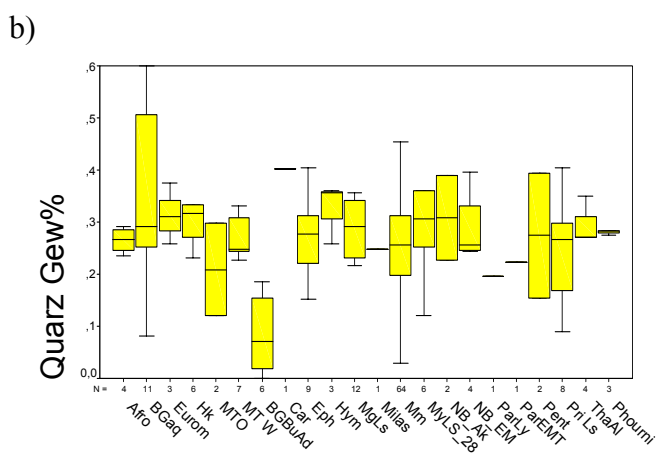
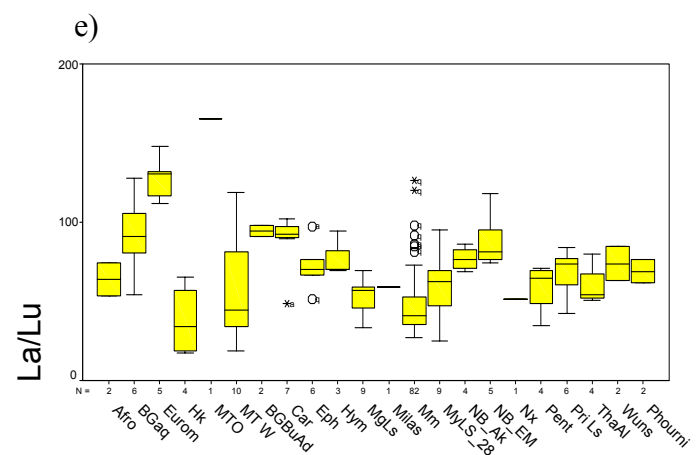
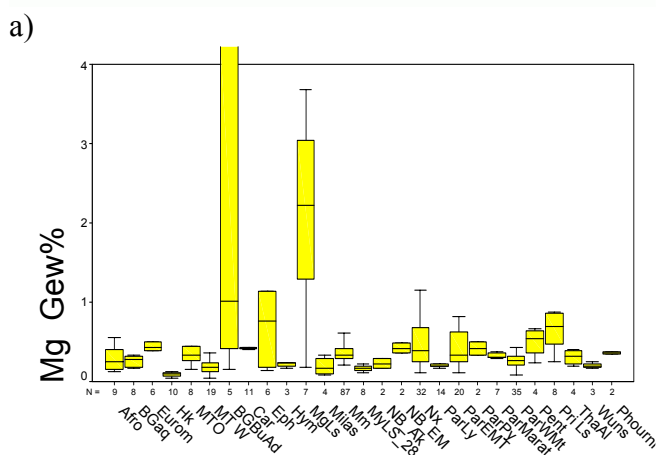
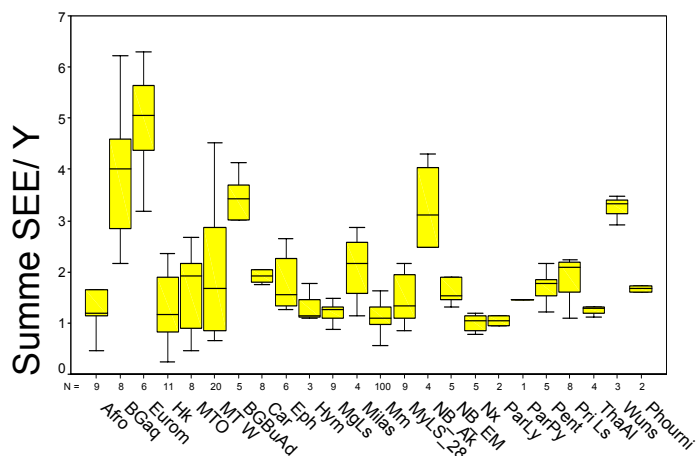
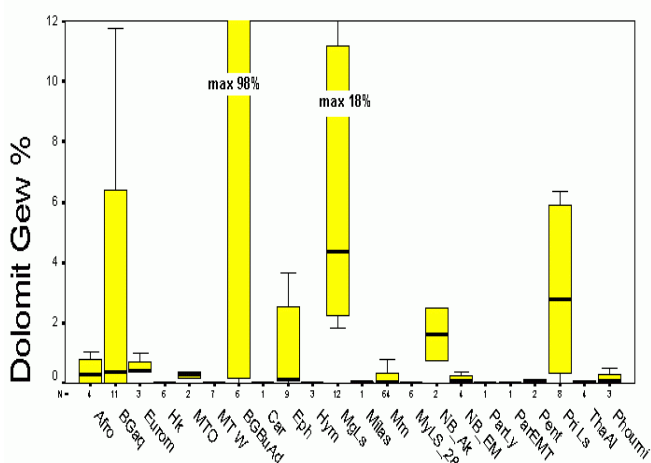
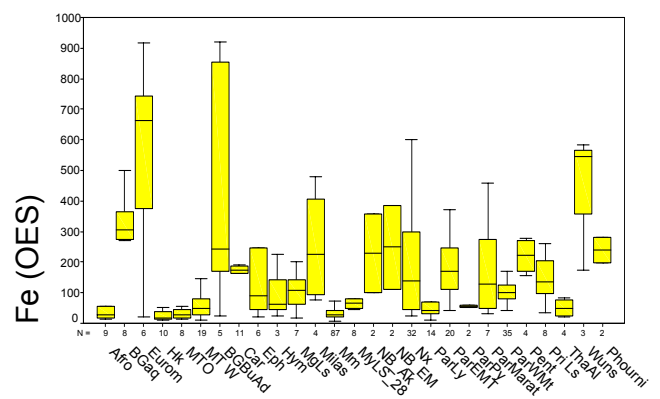
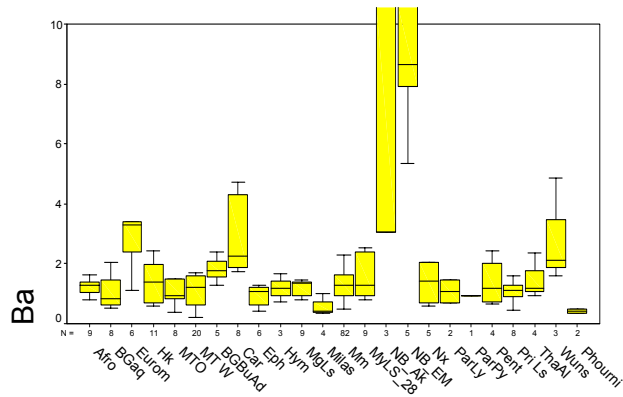


Abbildung 71: Mittelwerte, Interquartilsbereiche und Standardabweichungen des Fe/Sr-Verhältnisses von prokonnesischen und Paros-2-Marmoren. N gibt Anzahl der gemessenen Proben an, die meisten Paros-2-Werte wurden GERMANN (1988) entnommen

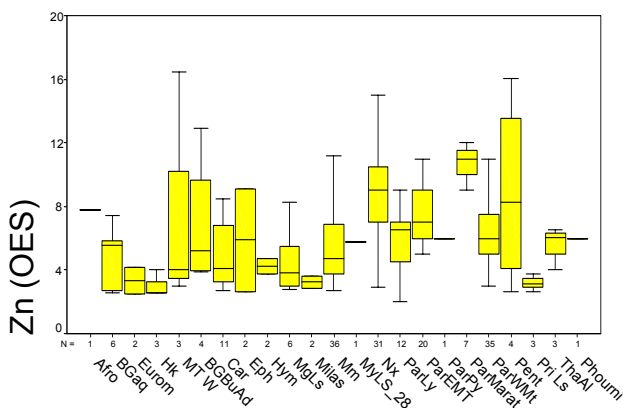


d)

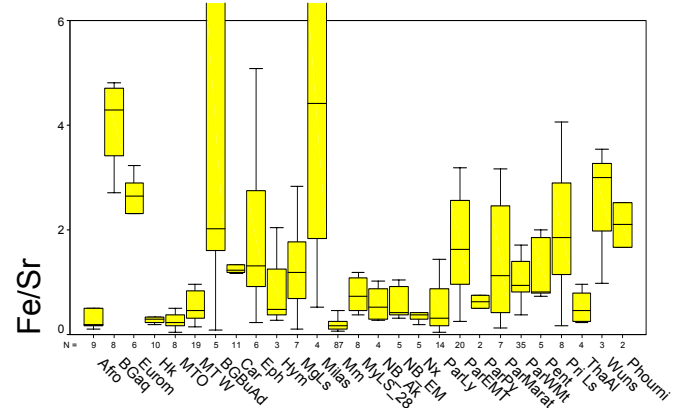
h)



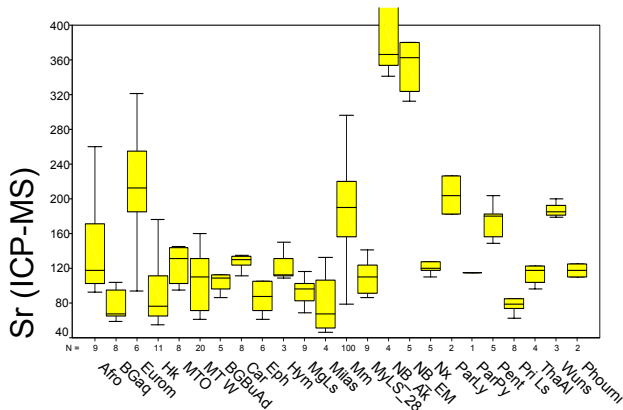
i)



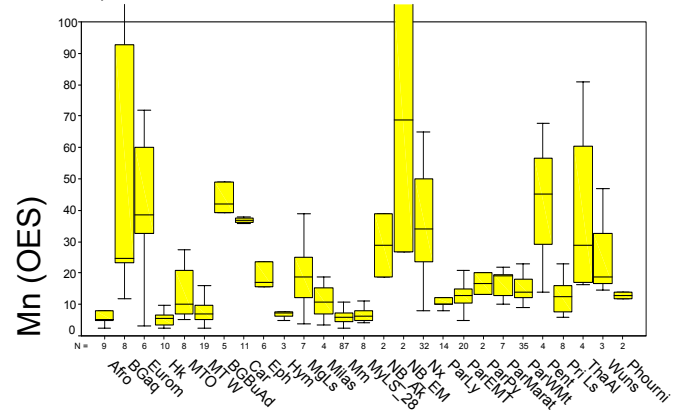
l)



j)



m)



k)

Abbildung 72 a-n: Mineral- und Elementgehalte sowie ausgewählte Elementverhältnisse verschiedener Lagerstättenmarmore. N: Anzahl der Meßproben, alle Angaben in ppm, außer bei Dolomit, Mg und Quarz (Gew%)

n)

5.1.1 Dolomit und Quarz

Wie bereits in Kapitel 4.5 ausgeführt, können stark variierende dolomitische Anteile – und mit ihnen korreliertes Mg – ein Merkmal mancher Lagerstätten sein, während andere Marmorlagerstätten einheitlich niedrige oder hohe Dolomitgehalte aufweisen (Abbildung 72 a und b). Weitere Aspekte werden in Kapitel 5.4.5 diskutiert. Seltener geben die pulverdiffraktometrisch ermittelten Quarzgehalte herkunftsindezierende Hinweise, z.B. die niedrigen Werte

der dolomitreichen Marmore von BGBuAd (Bafasee bei Burgass Adasi) verglichen mit dem höheren Einzelwert von Carrara oder denen von Stratonikeia (Abbildung 72 c). Weitere Beispiele wurden am Ende von Kapitel 4.5 gezeigt, wo eine Abbildung der im Wesentlichen symmetrischen Normalverteilung bereits ein statistisches Indiz für den geringen diskriminatorischen Nutzen der XRD-Quarzgehalte liefert. Aussagekräftiger können demgegenüber die unter dem Mikroskop erkennbaren Anteile an Quarz und anderen akzessorischen Mineralien sein.

5.1.2 Seltenerdelemente SEE

Die in Abbildung 72 d erkennbare beträchtliche Spreizung der Summe der SEE verdeutlicht noch einmal, dass die Absolutgehalte der SEE nur sporadisch eine Lagerstättendiskriminierung erlauben (s. Kapitel 4.6.1). Demgegenüber lässt sich mit Elementverhältnissen wie $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ (e), La/Lu (f), Ce_{neg} (g) und Y/Ho (h) das diskriminatorische Potential beträchtlich verbessern.

5.1.3 Ba, Zn, Sr, Fe, Mn

Abgesehen von der geringen Zuverlässigkeit der meisten Messwerte von Ba und Zn (Abbildung 72 i und j), deutet sich lediglich bei den höheren Ba-Gehalten der Marmorproben von Carrara, Euromos, dem Kozak⁴⁸ (N-Bergama) und Wunsiedel ein diskriminatorisches Potential an, insbesondere bei den beiden letzten mit einer gewissen Relevanz gegenüber Marmara. Unter den feinkörnigen Marmoren vermag Ba ansatzweise die Carrara-Proben von denen aus Penteli, Phourni und Milas abzugrenzen. Demgegenüber sind die keineswegs immer positiv korrelierten Gehalte an Sr, Fe und Mn (Abbildung 72 k, l und n) nicht nur besser reproduzierbar, sondern weisen auch häufiger lagerstättenspezifische Signaturen auf. Wie schon in Abbildung 71 für die Unterscheidung der prokonnesischen von Paros-2-Marmoren gezeigt, lässt sich z.B. mit dem Fe/Sr-Verhältnis die Abgrenzung unter Umständen weiter verbessern (Abbildung 72 m).

5.1.4 Bivariate Diagramme

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit sind bivariate Wertepaare chemischer Elemente, die im Diagramm unter Umständen Lagerstätten in Feldern oder Clustern gruppiert erkennen lassen. So weisen in Abbildung 73 weiße Marmore von Aphrodisias gleichermaßen niedrige Fe-Gehalte wie die prokonnesischen Proben des Großen Frieses vom Pergamonaltar auf, während die höheren Sr-Gehalte des Großen Frieses eine deutlichere Abgrenzung ermöglichen. Die

in Abbildung 74 aufgrund der ausgeprägten Spannweite und Linksschiefe logarithmische Darstellung der Fe- und Mn-Gehalte von Aphrodisias-Marmoren und Marmoren aus der südwestlichen Menderes-Region erlaubt ebenfalls eine gewisse Unterscheidung, erscheint jedoch infolge höherer Lagerstättenanzahl und stärkerer Überlappung auch beträchtlich unübersichtlicher. Die schon vorgestellten und detaillierter in Kapitel 7.2 erläuterten Isotopendiagramme sind ebenfalls bivariat, wobei üblicherweise δO auf der x-Achse und δC auf der y-Achse aufgetragen werden. Zusätzliche Auswahlkriterien wie z.B. die Farbe, Korngrößen oder nur bestimmte Lagerstätten können bei allen bivariaten Diagrammen die Übersichtlichkeit wieder erhöhen. So werden in Abbildung 82 lediglich die Isotopendaten von Marmoren mit mehr als 3 Gew% Dolomit wiedergegeben.

Das Hinzufügen einer dritten Achse, sei es als Dreikomponentendiagramm oder als dreidimensionale räumliche Punktwolke, hat bei den Marmoren keine Verbesserung aussagekräftiger Diskriminanzdiagramme gebracht sondern im Gegenteil die Anschaulichkeit reduziert. Die zusätzliche Einbeziehung von Komponenten ($n = 1, 2, 3$ bis unendlich) spannt einen n-dimensionalen Vektorraum auf, der sich ab $n > 3$ nur noch mit mathematischen Methoden der multivariaten Statistik wie Cluster- und Diskriminanzanalyse erfassen lässt.

⁴⁸ Inwieweit die hohen Ba-, Sr-, Fe- und Mn-Gehalte auch der gut auskristallisierten Kozakmarmore im Zusammenhang mit ihrer kontaktmetamorphen Bildung stehen, ist sicherlich eine eigene Untersuchung wert.

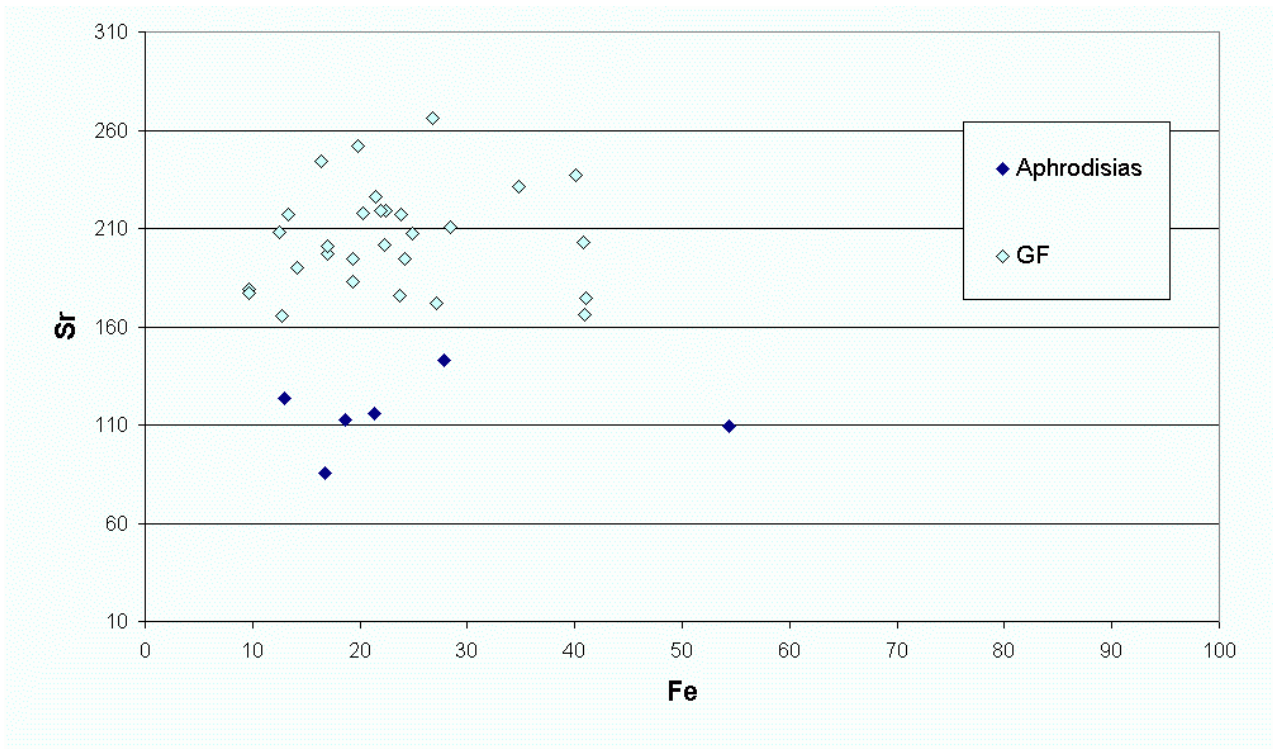


Abbildung 73: Bivariates Fe-Sr-Diagramm prokonnesischer und Aphrodisias-Marmore

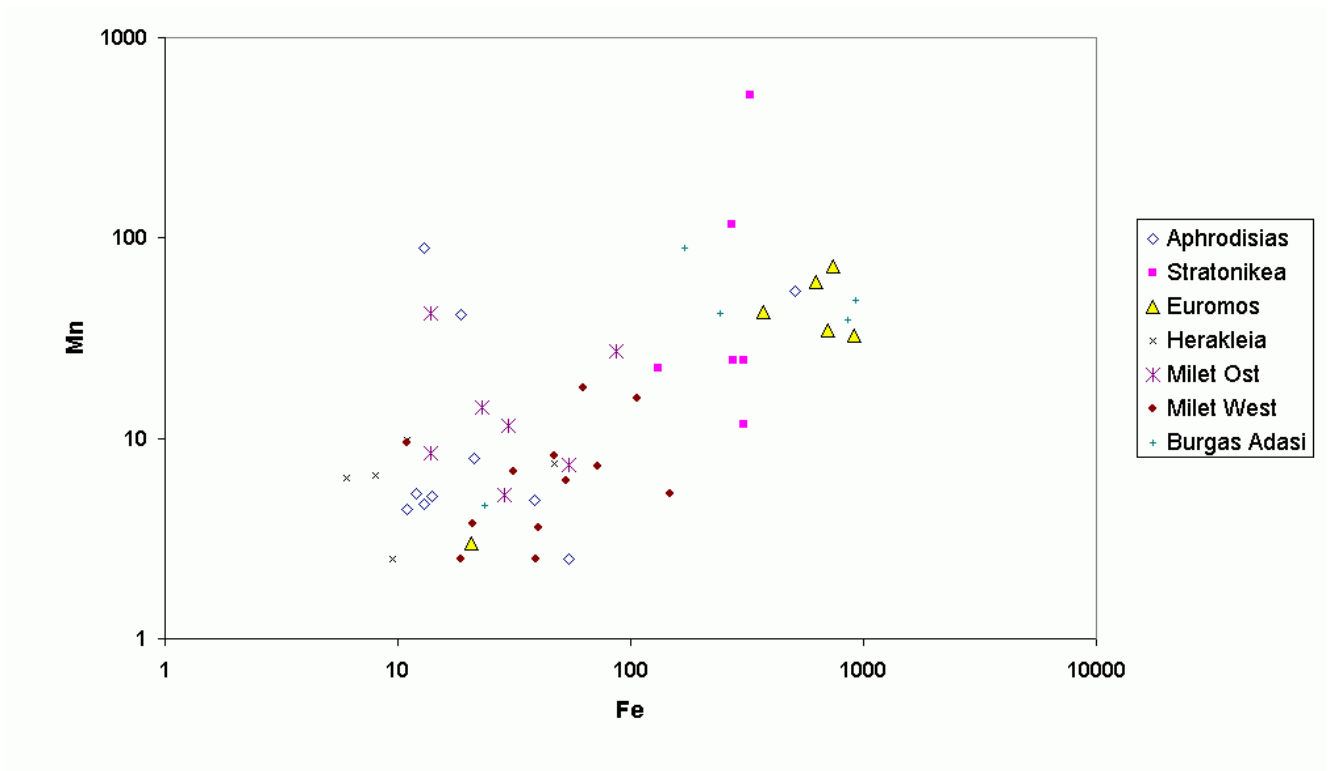


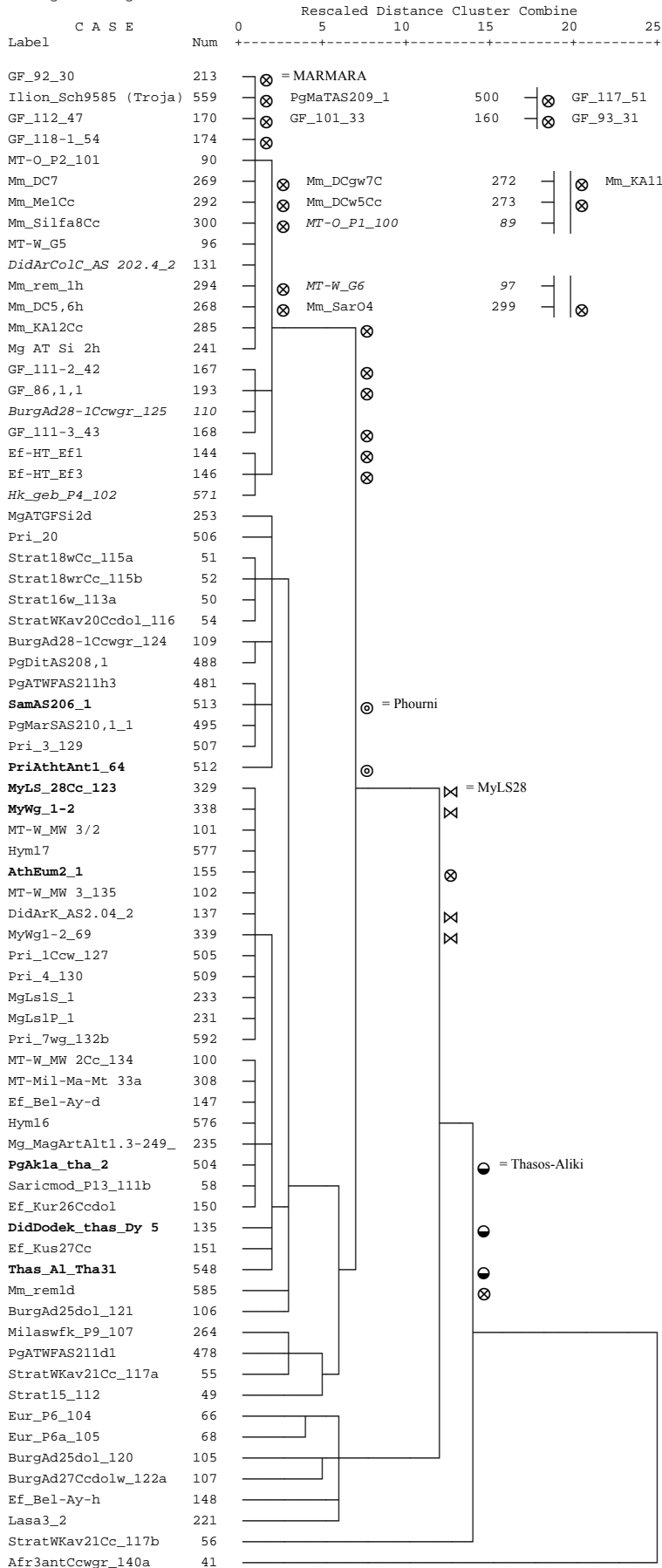
Abbildung 74: Fe-Mn von Marmoren aus Aphrodisias und der westlichen Menderes-Marmorsequenz

5.2 Clusteranalyse (CA)

Mit der hierarchischen Clusteranalyse „wird anhand ausgewählter Merkmale versucht, relativ homogene Fallgruppen oder Variablen zu identifizieren. Dabei wird ein Algorithmus eingesetzt, der für jeden Fall, oder für jede Variable, einen separaten Cluster bildet und die Cluster so lange kombiniert, bis nur noch einer zurückbleibt.“ (SPSS-Hilfetext). Für die Marmorherkunftsbestimmung kann sie insbesondere Sinn haben, wenn die Fallgruppen (Lagerstätten) nicht allzu zahlreich sind, zugleich relativ ähnliche Größe haben und eindeutige Unterscheidungsmerkmale fehlen. Insgesamt hat sich die Clusteranalyse nicht als ein optimales Verfahren zur Herkunftsbestimmung erwiesen. Sie wurde erst nach der insbesondere in Kapitel 7 beschriebenen detaillierten Provenienzanalyse durchgeführt, was eine sofortige Plausibilitätskontrolle der CA-Ergebnisse erlaubte. Aufgrund der überproportional hohen Probenzahl und recht homogenen Eigenschaften der prokonnesischen Marmore ist insbesondere deren CA-Zuordnung meist korrekt. Das untere Beispiel (Abbildung 75) mit Lagerstätten- und Artefaktproben wurde exemplarisch aus zahlreichen getesteten Variablen- und Methodenkombinationen herausgegriffen, die zu teilweise unterschiedlichen Einzelzuordnungen führen, aber insgesamt ein ähnliches Bild ergeben. Außerdem wurden mehrere Variablen ausgewählt, die nicht in allen Datensätzen gleichzeitig vorhanden sind, um die Zahl der angezeigten Fälle für eine bessere Übersichtlichkeit gering zu halten (84 von 556 Datensätzen), da das Dendrogramm ansonsten mehrere Seiten ohne zusätzlichen Informationsgewinn ausgefüllt hätte: *MGS2* (zweitgrößter *MGS*-Wert) *Dolomit*, *Quarz*, $\Sigma\text{REE}/\text{Y}$, *Cerneg*, *La/Ce*, *Mg*, *Mn*, *Fe*, *Sr*, $\Sigma\text{Fe}/\text{Sr}$, δC (δO wurde weggelassen, da die breitere Spannweite der Sauerstoffisotopie das Ergebnis diffuser gestaltet).

Häufig wird die Ward-Methode bei Verwendung eines quadratischen euklidischen Distanzmaßes empfohlen. Aber auch andere Verfahren wie das hier dargestellte MEDIAN-Clustering mit City-Block-Messung als Distanzmaß haben sich als ähnlich geeignet erwiesen. In Abbildung 75 ist z.B. erkennbar, dass die aus Marmara stammenden bzw. ihm zugeordneten Proben (Mm bzw. ⊗) fast vollständig im oberen Cluster zusammengefasst sind. Es handelt sich insbesondere um den Großen Fries (GF), den Marktempel in Pergamon und den Athenatempel von Troja. Die beiden Hafenthermenproben von Ephesos (EF-Ht) im Marmara-Hauptcluster sind fälschlicherweise mit einer gebänderten Herakleia-Probe in einen eigenen Subcluster erfasst. Ähnliches gilt für weitere, kursiv dargestellte, Fehlklassifizierungen. Auch einige Lagerstättenproben liegen häufig eng bei einander, wie an den Probenbezeichnungen ersichtlich ist (z.B. Strat). Wenn auch nicht immer im gleichen Subcluster, liegen sowohl die antiken Proben aus Phourni (⊙), von MyLS28 (⊠) und Thasos-Aliki (⊙) ebenfalls eng beieinander. Ansonsten ist aber ersichtlich, dass eine lediglich CA-basierte Herkunftsbestimmung für die meisten der antiken Objekte unzutreffende Ergebnisse gebracht hätte. Die CA erlaubt bestenfalls eine erste Vorauswahl, die häufig durch schlichte petrographische Merkmale wesentlich zuverlässiger geleistet werden kann. Die zutreffenden Ergebnisse insbesondere bei den Marmoren prokonnesischer Provenienz bestätigen aber zugleich, dass die in dieser Arbeit verwendeten geochemischen Variablen sinnvoll sind. Bei einem bedeutend größeren Umfang der einzelnen Lagerstättenkollektive könnte auch die CA die unbestreitbaren Vorzüge dieses Verfahrens der multivariaten Statistik deutlicher unter Beweis stellen.

***** H I E R A R C H I C A L C L U S T E R A N A L Y S I S *****
 Dendrogram using Median Method



Verarbeitete Fälle(a,b)					
a City-Block-Distanzmaß wurde verwendet					
b Median-Linkage					
Gültig		Fehlend		Gesamt	
N	Prozent	N	Prozent	N	Prozent
84	15,1	472	84,9	556	100,0

Abbildung 75: Dendrogramm aus Clusteranalyse mit 84 gültigen Fällen, oberer Prokonnesos-(Marmara)-Cluster nach rechts aufgesplittet

5.3 Diskriminanzanalyse (DA)

Mit der Diskriminanzanalyse wird versucht, Diskriminanten zu finden, deren Werte eine möglichst weite Trennung in Gruppen (hier Marmorlagerstätten) erlauben. Jede Gruppe (Lagerstätte) wird durch eine Anzahl Proben (Gruppengröße) und deren verwendete Messwerte (Variablen) definiert.

Im Idealfall können dann diese Funktionen auf neue Fälle mit Messungen für die Einflussvariablen, aber unbekannter Gruppenzugehörigkeit (antike Marmorproben) angewandt werden.

Die kanonische Diskriminanzanalyse ermittelt aus Linearkombinationen Quotienten mit maximaler Variabilität zwischen den Gruppen und innerhalb der Gruppen. Die erste Linearkombination, die dieses Kriterium am besten erfüllt, wird als erste kanonische Diskriminanzfunktion bezeichnet. Die Ermittlung der zweiten kanonischen Diskriminanzfunktion erfolgt dementsprechend soweit sie die Bedingung erfüllt, dass sie nicht mit der ersten korreliert ist. Die Variablen ohne Auswirkung auf die Gruppenbildung können eliminiert werden.

SPSS verlangt die Erfüllung einiger Bedingungen:

„**Daten:** Die Gruppenvariable muss über eine begrenzte Anzahl unterschiedener Kategorien verfügen, die als ganzzahlige Werte kodiert werden. Unabhängige nominale Variablen müssen in Dummy- oder Kontrastvariablen umkodiert werden.

Annahmen: Die Fälle müssen unabhängig sein. Einflussvariablen müssen in multivariater Normalverteilung vorliegen, und die Varianz-Kovarianz-Matrizen innerhalb der Gruppen müssen zwischen den Gruppen gleich groß sein. Die Gruppenzugehörigkeit muss sich wechselseitig ausschließen (das heißt, kein Fall gehört zu mehr als einer Gruppe) und umfassend sein (das heißt, alle Fälle gehören zu einer Gruppe). Diese Prozedur ist am effektivsten, wenn die Gruppenzugehörigkeit eine kategoriale Variable ist. Wenn die Gruppenzugehörigkeit dagegen auf den Werten einer kontinuierlichen Variablen basiert (zum Beispiel bei einem Vergleich von IQ-Werten), dann sollten Sie besser die lineare Regression verwenden, um von den reichhaltigeren Informationen zu profitieren, die in der kontinuierlichen Variablen selbst enthalten sind.“

Die meisten Messwerte sind jedoch kontinuierliche Variablen, die teilweise miteinander korreliert sind. Die Problematik der Erzwingung von Normalverteilung mittels Logtransformation wurde schon besprochen.

Trotz dieser z.T. nicht erfüllten Einschränkungen hat die Diskriminanzanalyse (DA) einige interessante Ergebnisse geliefert. Wie schon bei der Clusteranalyse erfolgte die Diskriminanzanalyse nach Hinzufügung der antiken Objekte zu den ihnen zugeordneten jeweiligen Lagerstättenkollektiven. Die Auswahl wird hier für eine bessere Übersichtlichkeit auf folgende – im Kapitel 6 ausführlich beschriebenen – Lagerstätten beschränkt: *Aphrodisias*, *Bgaq-Stratonikeia*, *Euromos*, *Herakleia*, *MTO - Milet Ost*, *MT W – Milet West*, *Carrara*, *Hymettos*, *MgLS – Magnesia Lagerstätte*, *Mm – Marmara Prokonnesos*, *MyusLS_28* und *Penteli*. Auswahlvariablen waren *MGS2*, *ΣREE*, *ΣREE/Y*, *La/Ce*, *Mg*, *Fe*, *Mn*, *Sr*, *Fe/Sr*, *δO* und *δC*, so dass insgesamt 134 Fälle ausgewertet wurden. Eine durch die große Probenzahl (>50%) prokonnesischer Marmore ratsam erscheinende A-Priori-Wichtung der Fälle verbesserte die korrekten Klassifizierungsergebnisse in der Tat von 84,3 auf 88,1% aller Fälle. Ohne Mg wurden ebenfalls 88,1% erreicht, aber z.B. eine falsch klassifizierte dolomitreiche Marmara-Probe von Milet Ost nach Magnesia verschoben.

Wie aus Tabelle 21 hervorgeht, erklären die ersten beiden Diskriminanzfunktionen 72,1% der Gesamtvarianz (ohne Mg nur 67%), und 99,7% werden durch die ersten 8 Funktionen erklärt. Tabelle 22 verdeutlicht, wie die einzelnen Variablen auf die unterschiedlichen standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionen einwirken, darunter sind die größten absoluten Korrelationen zwischen jeder Variablen und der jeweiligen Diskriminanzfunktion mit einem Stern markiert. Aufgrund des ausgesprochen dürftigen Graphik-Interfaces von SPSS sind die aus den ersten beiden Diskriminanzfunktionen berechneten Zuordnungen in Abbildung 76 nur sehr schlecht erkennbar. Es wird aber deutlich, dass die Lagerstätten BGAq (Stratonikeia), MgLS (Magnesia) und Marmara getrennte Cluster belegen, während bei den anderen Marmoren die visuelle Unterscheidung im Diagramm wesentlich schwerer fällt. Deutlicher gehen die Klassifizierungsergebnisse aus Tabelle 23 hervor. In den Zeilen ist die Zuordnung der tatsächlichen Herkunft auf die mit den Diskriminanzfunktionen berechneten Herkunftsangaben ablesbar, in den Spalten die Aufteilung der (evtl. irrtümlich) berechneten auf die tatsächlichen Lagerstätten. Von den 68 prokon-

nesischen Marmorproben ist lediglich eine falsch zugeordnet, alle als prokonnesisch identifizierten antiken Objekte sind korrekt klassifiziert. Bei – allerdings insgesamt wesentlich geringerer Probenzahl – sind die Proben von BGAq (Stratonikeia), Milet Ost, Hymettos, Magnesia, Myus und Penteli zu 100% korrekt zugeordnet. Die meisten Fehlzuordnungen weisen die Aphrodisias-Proben auf.

Umgekehrt wurde keine Probe fälschlich Aphrodisias, BGAq, Euromos, Carrara, Hymettos, Myus oder Penteli zugeordnet.

Die dreiseitige Einzelfallstatistik im Anhang (10.15) zeigt, dass fast alle antiken Objekte den in Kapitel 7 ermittelten Lagerstätten korrekt zugeordnet wurden. Lediglich die beiden Proben des Naiskos von Didyma (DidNaiskDy 12 und DidNaiskAS212_1) sind Milet West statt Herakleia zugeordnet, und umgekehrt der Altar von Magnesia (Mg_MagArtAlt1.3-249_63) den Brüchen von Herakleia anstelle von Milet West. Jedoch wurden auch die aus den Brüchen von Milet West stammenden Proben (MT-W_G6 und MT-W_MW3_135) Herakleia (Hk) zugeordnet, und die Probe MT-W_MT_West dem östlichen Bruchgebiet (MTO). Diese Ergebnisse bestätigen statistisch die oft schwierige Unterscheidbarkeit der Marmore am Ostufer des Bafa-Sees.

Dass aufgrund ihres homogenen Merkmalspektrums sämtliche Marmara zugeordneten antiken Objekte auch durch die DA als prokonnesisch bestätigt werden, ist nicht erstaunlich. Bemerkenswert ist jedoch das hohe Maß an übereinstimmenden Klassifizierungen insgesamt, so sämtlicher Zuordnungen antiker Objekte (Didyma archaische Columna Caelata, Milet Delphinion [Platte, Kyma, Volute], Myus Wagenrennenfries) zu der Lagerstätte MyLS28.

Von entscheidender Bedeutung sind sowohl Zahl und verwendete Merkmale der Lagerstätten als auch die insgesamt eingesetzten Variablen. Wird z.B. die petrographische Korngrößenvariable MGS weggelassen, erhöht sich zwar die Zahl der erfassten Fälle von 134 auf 153 (da die MGS nicht von allen Proben erfasst werden konnten), aber die korrekten Klassifizierungen sinken von 88,1 auf 77,8%. Insbesondere die Brüche am Ostufer des Bafa-Sees werden nun untereinander häufiger falsch eingeordnet, nur noch eine Aphrodisiasprobe korrekt, während

einige Proben aus 6 Lagerstätten fälschlich Marmara zugeordnet werden.

Bei Hinzufügung von 10 Proben aus drei weiteren Lagerstätten (Phourni, Thasos-Aliki, Wunsiedel) sinkt die Zahl der korrekt zugeordneten Fälle zwar lediglich geringfügig auf 87,4%. Aber nur noch 6 von 15 Lagerstätten werden nun zu 100% korrekt klassifiziert, und die Zahl der korrekt klassifizierten antiken Objekte nimmt insgesamt ab. Die Herstellung antiker Objekte aus Thasos-Aliki- und Phourni-Marmoren wird zu 100% bestätigt, die Probe einer modernen Ergänzung des Großen Frieses jedoch von Wunsiedel nach Aphrodisias verschoben.

So überzeugend die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse auf den ersten Blick erscheinen mögen, muss jedoch wie schon bei der Clusteranalyse betont werden, dass sie unter einem schweren methodischen Defekt leiden. Aufgrund der teilweise sehr geringen Probenzahl aus Lagerstätten wurden die Lagerstättenkollektive unter Einbeziehung der oft zahlreicheren antiken Objekte definiert, die mittels der im Kapitel 6 und besonders 7 detailliert beschriebenen Methoden den jeweiligen Marmorsteinbrüchen zugeordnet wurden. Dies führt unweigerlich dazu, dass die meisten der antiken Objekte anschließend „korrekt zugeordnet“ werden. Im Vorfeld hatte sich bereits gezeigt, dass bei getrennter Eingabe von Lagerstätten- und Museumsproben – abgesehen von den prokonnesischen Marmoren – die Ergebnisse meist nur unter 50% korrekt waren und gerade bei den interessanten Fällen häufig vollständig in die Irre führten.

Deshalb wird hier die Diskriminanzanalyse nicht als statistisches Werkzeug zur Herkunftsbestimmung verwendet, ist aber zur nachträglichen Überprüfung der Zuordnungen durchaus geeignet. Insbesondere bestätigt sie die Nützlichkeit der verwendeten geochemischen Variablen und Elementverhältnisse ebenso wie die Unverzichtbarkeit der Einbeziehung petrographischer Parameter (Verbesserung um 10% alleine bei Verwendung der MGS) für die Provenienzanalyse. Die mit den antiken Proben erweiterte Lagerstättendatenbank erlaubt nun natürlich auch eine zuverlässigere Zuordnung neuer antiker Objekte, wenn sie aus den erfassten Lagerstättenmarmoren hergestellt wurden. Im Normalfall steht jedoch für die Marmorher-

kunftsbestimmung eine solch umfangreiche und über einen längeren Zeitraum entwickelte Datenbank nicht zur Verfügung. Deshalb werden im folgenden Unterkapitel Möglichkeiten zur Differenzierung nach äußeren Merkmalen ähnlicher Marmore beschrieben, bevor im Anschluss an die detaillierte Lagerstättenbeschreibung und Herkunftsbestimmung in Kapitel 8 ein computergestütztes multivariates Marmordiagnosesystem vorgestellt wird, das auch ohne umfangreiche Datenbanken und Analytik eine Herkunftsbestimmung mit hoher Aussagekraft erlaubt.

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation
1	8,001(a)	49,0	49,0	,943
2	3,763(a)	23,1	72,1	,889
3	1,753(a)	10,7	82,8	,798
4	1,357(a)	8,3	91,1	,759
5	,523(a)	3,2	94,3	,586
6	,450(a)	2,8	97,1	,557
7	,298(a)	1,8	98,9	,479
8	,131(a)	,8	99,7	,341
9	,047(a)	,3	100,0	,213
10	,002(a)	,0	100,0	,041
11	,000(a)	,0	100,0	,005

Die ersten 11 kanonischen Diskriminanzfunktionen werden verwendet

Tabelle 21: Eigenwerte und Korrelation der verwendeten kanonischen Diskriminanzfunktionen

	Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten										Funktion	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Su REE	,376	,416	-1,045	,409	,354	,357	,193	,135	,205	,080	,081	
SuREE/Y	-,665	-,055	,373	,157	,538	,273	-,677	,304	,341	,111	-,015	
La/Ce	-,109	,330	,437	-,452	-,337	-,141	-,365	,836	-,005	,101	,098	
Fe (OES)	1,265	-1,715	-,331	-,756	,455	-1,674	-,102	,231	,386	,329	,277	
Mn (OES)	-,542	,035	,299	,091	-,010	,056	-,059	-,121	-,179	,578	,721	
Sr	,130	,228	,424	-,442	,384	,642	,496	-,125	-,392	-,255	-,098	
Fe/Sr	-1,460	1,849	,794	,627	-,436	,592	,508	-,007	-,385	-,425	-,555	
δO	-,046	-,098	,097	-,277	-,322	,114	,335	,138	,845	,238	,090	
δC	,543	,847	,227	,285	,168	-,194	-,227	-,163	,113	,184	-,144	
MGS2	,325	-,246	,321	1,058	,057	,143	,078	,381	,072	,079	,041	
Mg Gew%	,758	,069	,142	,303	-,043	,039	,251	,125	,170	-,677	,706	

	Struktur-Matrix										Funktion	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
δC	,469(*)	,462	,304	,015	,098	-,100	-,311	-,413	,202	,362	-,123	
Su REE	-,083	,276	-,575(*)	,028	,443	-,021	,332	,480	,003	,162	,145	
MGS2	,222	-,302	,276	,538(*)	-,081	,185	,248	,388	-,171	,371	-,271	
SuREE/Y	-,319	-,023	,127	,009	,682(*)	,017	-,346	,066	,435	-,316	,060	
Sr	,208	-,008	,319	-,324	,541(*)	,358	,460	,155	-,224	,184	-,094	
Fe (OES)	-,184	,044	,036	-,014	,520	-,628(*)	,483	,249	,043	-,022	,012	
Fe/Sr	-,398	,229	,031	,124	,315	-,550(*)	,533	,204	,053	-,203	-,038	
La/Ce	,161	,181	-,010	-,271	-,273	,084	-,182	,801(*)	-,285	,165	,056	
δO	,019	-,012	,172	-,150	-,212	,199	,371	-,075	,800(*)	,276	-,060	
Mg Gew%	,042	,112	,070	,047	,033	-,102	-,065	-,066	,224	-,724(*)	,620	
Mn (OES)	-,190	,104	,077	,036	,136	-,099	,208	-,110	-,227	,555	,709(*)	

Gemeinsame Korrelationen innerhalb der Gruppen zwischen Diskriminanzvariablen und standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionen. Variablen sind nach ihrer absoluten Korrelationsgröße innerhalb der Funktion geordnet.
 * Größte absolute Korrelation zwischen jeder Variablen und einer Diskriminanzfunktion

Tabelle 22: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten und Strukturmatrix aus Diskriminanzanalyse

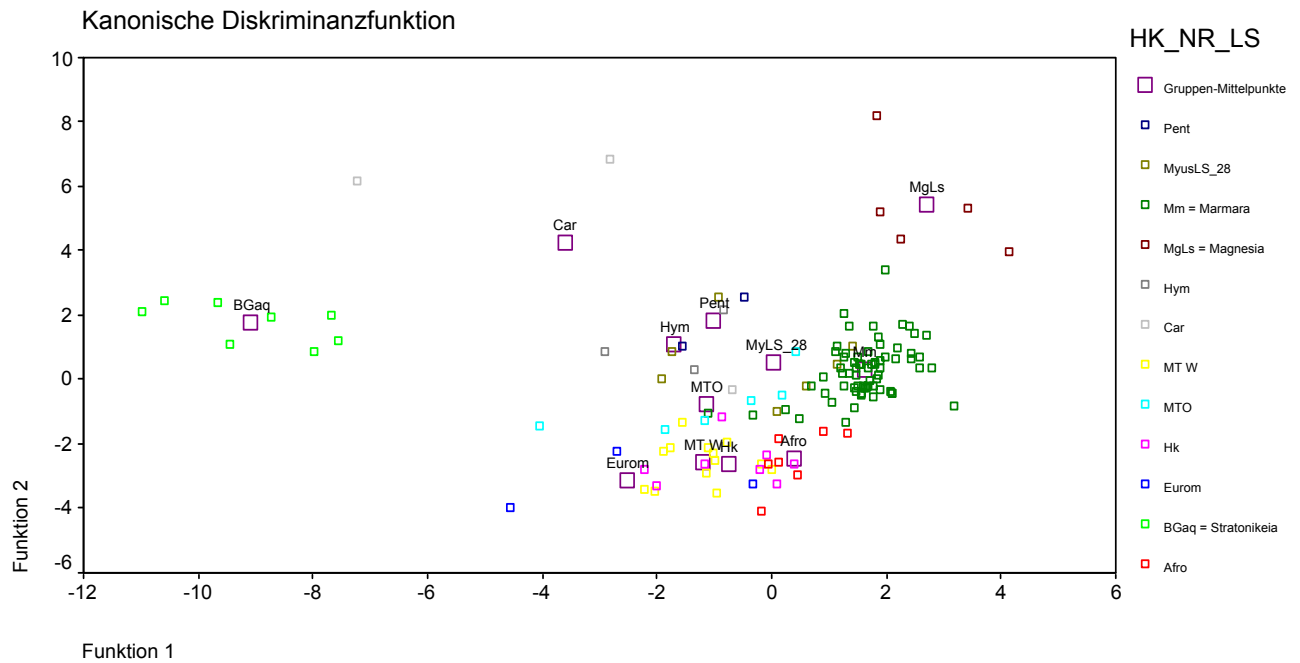


Abbildung 76: Streudiagramm von 12 Lagerstättenmarmoren aus der Diskriminanzanalyse

		Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit (88,1% der ursprünglich gruppierten Fälle korrekt klassifiziert)												
	HK_LS	Afro	BGaq	Eurom	Hk	MTO	MT W	Car	Hym	MgLs	Mm	MyLS_28	Pent	Ges
Anzahl	Afro	2	0	0	1	0	2	0	0	0	2	0	0	7
	BGaq	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	Eurom	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
	Hk	0	0	0	4	0	3	0	0	0	1	0	0	8
	MTO	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	6
	MT W	0	0	0	3	1	9	0	0	0	0	0	0	13
	Car	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	3
	Hym	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3
	MgLs	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5
	Mm	0	0	0	0	0	0	0	0	1	67	0	0	68
	MyLS_28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8
	Pent	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
%	Afro	28,6	,0	,0	14,3	,0	28,6	,0	,0	,0	28,6	,0	,0	100,0
	BGaq	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0
	Eurom	,0	,0	66,7	,0	33,3	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0
	Hk	,0	,0	,0	50,0	,0	37,5	,0	,0	,0	12,5	,0	,0	100,0
	MTO	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0
	MT W	,0	,0	,0	23,1	7,7	69,2	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0
	Car	,0	,0	,0	,0	33,3	,0	66,7	,0	,0	,0	,0	,0	100,0
	Hym	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	100,0
	MgLs	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	100,0
	Mm	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	1,5	98,5	,0	,0	100,0
	MyLS_28	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	100,0
	Pent	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	100,0

Tabelle 23: Klassifizierungsergebnisse von 134 Marmorproben aus der Diskriminanzanalyse

5.4 Petrographische Lagerstättenmerkmale mit höherer Signifikanz und Beispiele ihrer multivariaten Diskriminierung

Wie bei der Isotopie, den geochemischen Merkmalen in Kapitel 5.1 und in den beiden vorangegangenen Abschnitten gezeigt, erlaubt in der Regel nur die multivariate Einbeziehung verschiedener Merkmale die Zuordnung antiker Objekte zu Marmorlagerstätten. Im Detail erfolgt dies bei der Provenienzanalyse der antiken Artefakte und wird teilweise schon bei der Charakterisierung und Abgrenzung der Lagerstätten demonstriert. In diesem Kapitel werden abschließend verschiedene Marmormerkmale pauschal beschrieben, und exemplarisch signifikante Unterscheidungsmerkmale zu anderen Lagerstätten diskutiert.

5.4.1 Buntmarmore

Lässt sich in der hellenistischen Zeit vor allem die Verwendung weißer Marmore beobachten, so wurden Buntmarmore besonders seit der Römerzeit beliebt. Ihre Färbung erhalten sie zumeist durch höhere Anteile an akzessorischen Mineralien, so dass oft die Bezeichnung Marmor im petrographischen Sinn fragwürdig wird. Sie rückten in den letzten Jahren sowohl unter archäometrischen als auch modernen architektonischen Gesichtspunkten verstärkt in den Mittelpunkt von Untersuchungen (MIELSCH 1985; SCHNEIDER 1986; GNOLI 1997; HILLS 1999; GAIED *et al.* 2000; KOLLER 2003; LAPUENTE *et al.* 2003; LAZZARINI 2003; MARIOTTINI *et al.* 2003). Da hier vor allem weiße bis gräuliche archaische und hellenistische Marmore untersucht werden, spielen sie nur eine untergeordnete Rolle (Beispiele in Kapiteln 4.3 - Äußere Merkmale, 6.4.8 - Milas und 6.5 - Ephesos).

5.4.2 Gestreifte bis gebänderte Marmore

Regelmäßige parallele dunkle Bänderungen weisen insbesondere prokonnesische Marmore auf. Aber auch in überwiegend ungebänderten weißen Marmoren können vor allem in den Randlagen dunkle Bänderungen auftreten (z.B. Herakleia, Carrara und Abbildungen in Kapitel 4.3), die jedoch meist unregelmäßig sind. Bei manchen Lagerstätten können diese farblichen Inhomogenitäten so ausgeprägt sein, dass die Marmore insgesamt gräulich erscheinen (Pri-

ene, Euromos, einige Brüche bei Stratonikeia, Hymettos).

An drei Beispielen wird gezeigt, wie sich Marmore mit deutlich unregelmäßiger Streifung und Grautönen unterscheiden lassen:

Stratonikeia gebändert: unregelmäßige gräulich-rötliche Adern und Flecken, bis 10 Gew% Dolomit, niedrige Sr- (50-100 ppm), hohe Fe- (131-502 ppm) und Mn-Werte (12-514 ppm) (Fe/Sr = 2,7-4,8), Σ SEE/Y 2,2-6,2, La/Ce 0,6-0,9; δ O -5,9 bis -3,2, δ C -2,4 bis +1,8.

Euromos: ähnlich, aber mit vorwiegend geraden dünnen Bändern und eher grauem statt rotem Farbton, Dolomit < 1 Gew%, die Gehalte an Sr (111-318 ppm) und Fe (374-917 ppm) sind höher, an Mn niedriger (3-72 ppm); die negative Cer-Anomalie ist fast verschwunden (0,87-1,1; Stratonikeia: 0,46-0,87), La/Ce von 0,48-0,62. Teilweise Überlappung der Isotopie (δ O -8,3 bis -4,1; δ C 1-2,8).

Priene: fein-mittelkörnig, hoher Anteil an grauen Farbtönen und unregelmäßiger Streifung, bei teilweise hohen Dolomitgehalten (0-17 Gew%). Sr ist niedriger (58-99 ppm), Fe (34-261 ppm) und Mn (6-23 ppm) liegen im Mittelfeld. La/Ce (1,15-1,98) ist am höchsten.

5.4.3 Fein-, mittel- und grobkörnige Marmore

Die Korngröße ist v.a. eine Funktion des Metamorphosegrades, der Menge der die Korngrenzenwanderung und damit das Kristallwachstum behindernden feinverteilten Verunreinigungen sowie eventuellen postmetamorphen Stresses mit Kornzerkleinerung. Die Abgrenzung ist nicht immer einfach, insbesondere bei heterogenem Korngefüge, aber wird im Zusammenhang mit den Abbildungen in Kapitel 4.4.2 erleichtert. In Abbildung 77 sind die größten Korndurchmesser (MGS) verschiedener Lagerstättenmarmore dargestellt (zur Nomenklatur der Lagerstättenabkürzungen s. Beschreibung vor Abbildungen in Kapitel 5.1). In Abbildung 78 werden nicht die MGS des größten gemessenen Einzelkorns wiedergegeben, sondern des zweitgrößten Korns. Diese Werte sind häufig etwas niedriger, werden aber der Tatsache besser gerecht, dass besonders bei heterogenerem Korngefüge ein vereinzelt großes Korn eher zufällig auftreten kann. Dadurch erweist sich die Spannweite im zweiten Fall oft als breiter – ein durchaus realistischeres Bild.

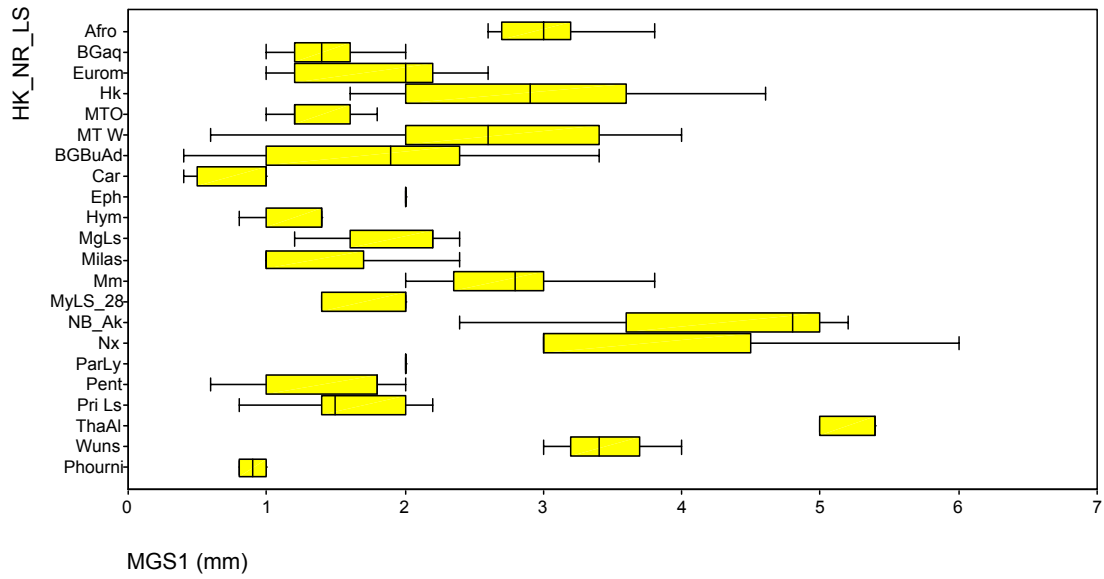


Abbildung 77: Maximum Grain Size – MGS (größter Korndurchmesser) der Lagerstättenmarmore

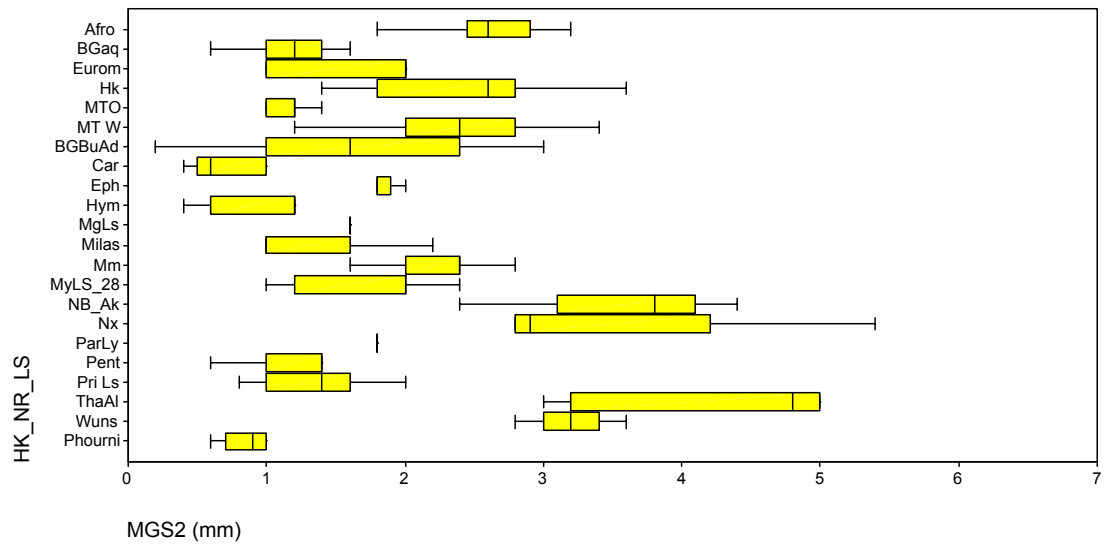


Abbildung 78: Maximum Grain Size – MGS (zweitgrößter Korndurchmesser) der Lagerstättenmarmore

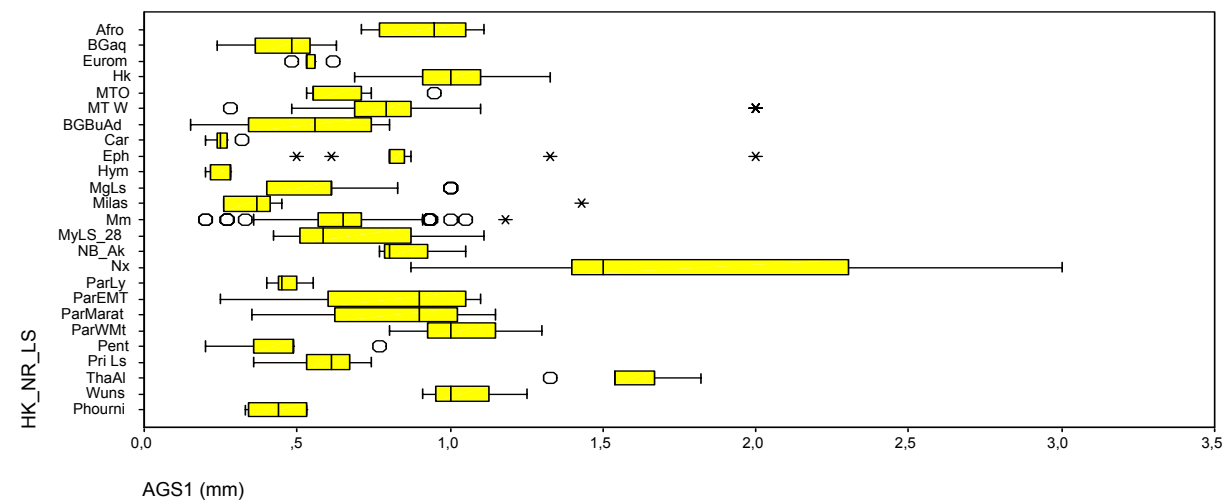


Abbildung 79: Average Grain Size – AGS (mittlere Korndurchmesser) einschließlich Ausreißern und Extremwerten der Lagerstättenmarmore

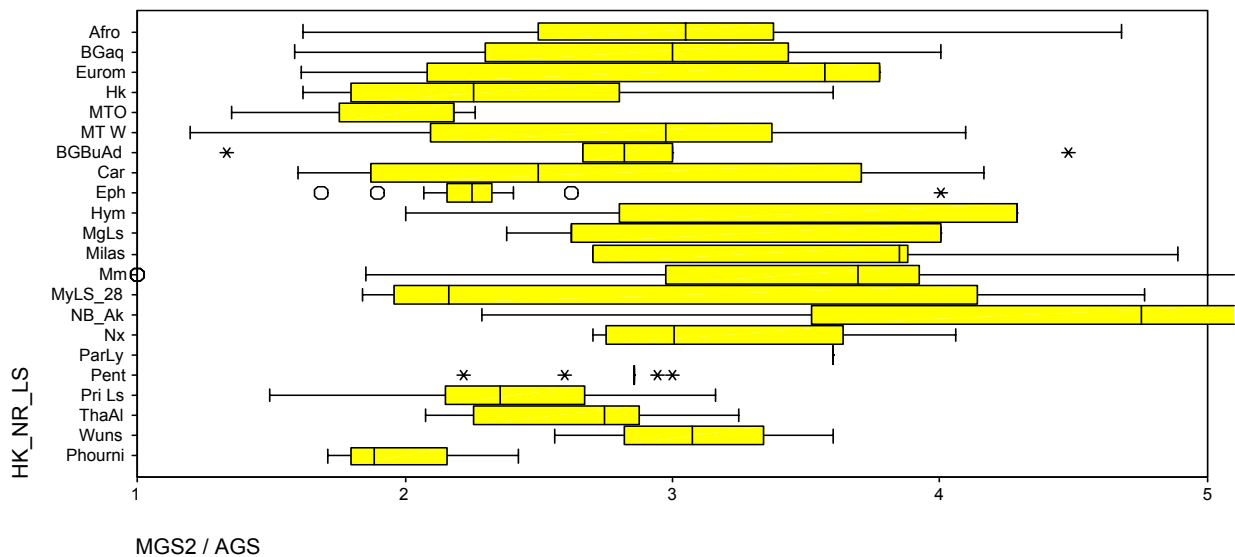


Abbildung 80: Quotient aus MGS und durchschnittlicher Korngröße einschließlich Ausreißern und Extremwerten als möglicher Indikator für Heterogenität des Korngefüges

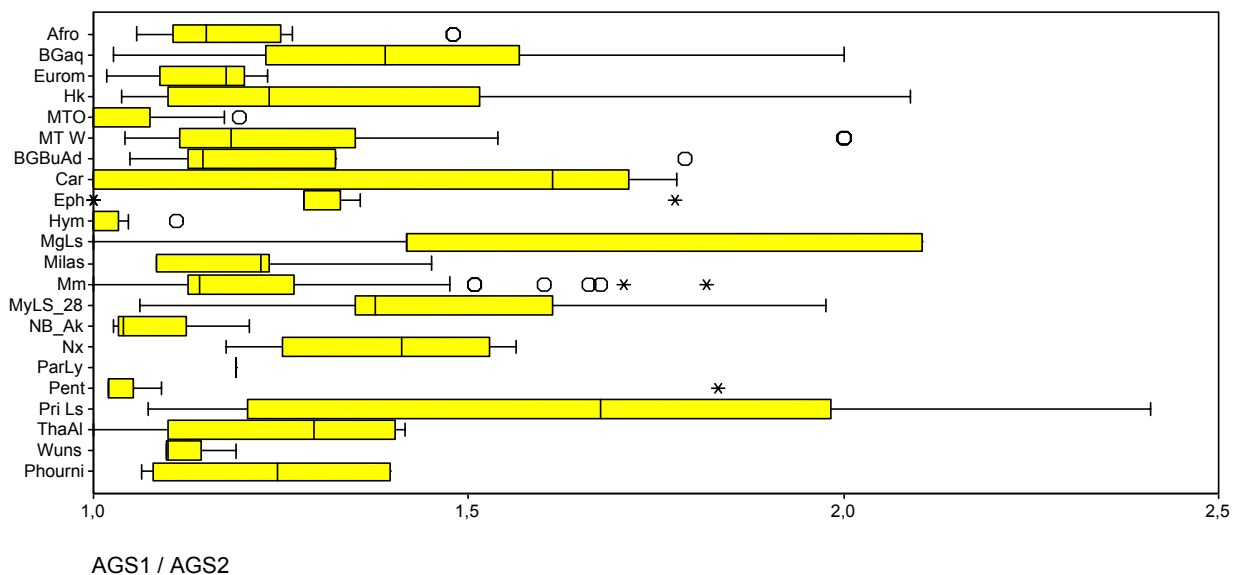


Abbildung 81: Quotient aus mittleren Korndurchmessern parallel zur längsten und kürzesten Kornerstreckung einschließlich Ausreißern und Extremwerten als Indikator für mögliche Kornlängung, Schichtung oder die Anwesenheit feinkörniger Bereiche im Dünnschliff

Weit verbreitete feinkörnige antike Marmore stammen von Afyon-Dokimeia, Penteli, Hymettos, Carrara, Milas, Paros-Lychnites, Phourni und teilweise Brüchen am Ostufer des Bafa-Sees. Beispiele zu ihrer Unterscheidung werden in dieser Untersuchung mehrfach diskutiert. Phourni-Marmore zeigen z.B. dünne Scharen dolomitischer Lagen.

Besonders grobkörnige Marmore kommen auf Naxos, Thasos-Aliki und teilweise in Aphrodisias, Muğla, Yatağan und Uşak vor.

Zwischen diesen beiden Extremen liegt die überwiegende Zahl von Lagerstätten mit mittelkörnigen Marmoren (2-3,8 mm).

Von Bedeutung für die Bestimmung der Korngröße ist auch das verwendete Verfahren. Oft erscheinen Marmore im Handstück grobkörniger als unter dem Mikroskop im Dünnschliff, wo ja nur selten die tatsächlich größten Korndurchmesser angeschnitten werden. Trotzdem ist die Feststellung des maximalen Korndurchmessers (MGS), der ein Indiz für den erreichten Metamorphosegrad ist, ein nützliches Verfahren. Bei Marmoren mit heterogenem Gefüge kann sich eine beträchtliche Spannweite der MGS zeigen (vgl. Abbildung 79). In manchen Marmoren tritt eine beachtliche Kristallprossung einzelner Kornindividuen in einer feinkörnigeren Matrix auf.

5.4.4 Heterogenes – homogenes Korngefüge

Im thermodynamischen Gleichgewicht entstandene Marmore zeigen zumeist ein homogenes Gefüge mit im Wesentlichen gleichen Korngrößen und auch zumeist regelmäßigen Korngrenzen, die sich oft in 120°-Winkeln berühren. Fein- bis mittelkörnige Marmore besitzen häufig ein homogenes Gefüge, das bei stärkerer Vergrößerung unter dem Mikroskop aber auch beträchtliche relative Korngrößendifferenzen aufweisen kann. Bei manchen Marmoren (z.B. Marmara) ist schon im Handstück ein heterogenes Korngefüge erkennbar, mit zahlreichen größeren Kristallen in einer feinkörnigeren Matrix, und Anzeichen von Dynamometamorphose. Auch hier gibt die Abbildungstafel in Kapitel 4.4.2 einen Überblick. Einen wenn auch nicht immer eindeutigen Indikator kann der Quotient aus MGS und AGS liefern, der mit zunehmender Heterogenität des Korngefüges größere Werte annimmt (Abbildung 80). Kornlängungen infolge Schieferung oder Schichtung lassen sich quantitativ durch den Quotienten aus parallel zu den längeren und kürzeren mittleren Korndurchmessern ermittelten AGS abschätzen (Abbildung 81). Allerdings sind in ihre Ermittlung gelegentlich auch feinkörnigere Bereiche eingegangen, die einen wesentlich isometrischen Kornverband durchziehen, so bei Carrara, MgLS und BGaq. Die bei den Priene-Marmoren angedeutete starke Kornlängung ist in erster Linie Resultat eines höheren Anteils duktiler dunkler Mineralien in einem nur schwach auskristallisierten Marmor. MyLS28 weist demgegenüber eine tatsächliche Kornlängung der Calcitkristalle auf, die unter dem Mikroskop aber nur bei einigermaßen parallelen Schnitten erkennbar ist.

Ein stark heterogenes Korngefüge bei mittleren Korndurchmessern charakterisiert Marmore von Marmara, Paros II und teilweise Aphrodisias. Die prokonnesischen Marmore zeigen jedoch meist eine charakteristische Bänderung, niedrigere Fe- und Mn- sowie höhere Sr-Gehalte und strömen beim Zermahlen einen starken Geruch nach H₂S-Eiern aus. Die – oft auch gleichkörnigen – Marmore von Aphrodisias unterscheiden sich von den beiden anderen u.a. durch eine leichtere Kohlenstoffisotopie und/oder leichtere O-Isotopen. Unter den grobkörnigeren Marmo-

ren zeigen die von Thasos-Aliki und besonders von Naxos ein durchweg starkes bis extrem starkes heterogenes Korngefüge. Die ersteren strömen jedoch regelmäßig einen intensiven Geruch nach H₂S beim Zerschlagen auf, außerdem ist die Isotopie deutlich unterschiedlich.

5.4.5 Dolomitische Marmore

Heute wird allgemein davon ausgegangen, dass das Material der meisten aus dolomitischen Marmoren hergestellten antiken Skulpturen von den Cape-Varthy-Brüchen auf Thasos stammt. Ihre Härte, für dolomitische Marmore recht große Korndurchmesser, Homogenität und weißer Farbton (wenig Fe) machten sie zu einem geeigneten Skulpturmateriale, das auch heute noch unter dem Handelsnamen „Thasos White“ wichtigster thasischer Exportmarmor ist. Zusätzlich erleichtert ihr recht enges Isotopenfeld (T3 in Abbildung 82) die Zuordnung.

Jedoch bestätigt auch diese Untersuchung, dass dolomitische Anteile in zahlreichen antiken Marmorlagerstätten auftreten können (s. Kapitel 4.5). Hierbei handelt es sich zumeist aber um auch äußerlich unterscheidbare Inhomogenitäten vorwiegend calcitischer Marmorlagerstätten – oft als Boudinagen, feinkörnige Bereiche mit positivem Verwitterungsrelief oder Bestandteile dunklerer Partien auftretend.

Teilweise hohe Dolomitmeßwerte weisen in Abbildung 83 z.B. die Marmore bei Stratoni-keia (Bg aq) sowie von den Brüchen gegenüber Burgass Adasi (Bg NW), Ephesos, Magnesia und Priene auf. Auch auf Marmara sind vereinzelt hohe Dolomitanteile anzutreffen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass von diesen Lagerstätten teilweise nur wenige Proben entnommen und diese auch gezielt auf Dolomit untersucht wurden.

Schon der bivariate Vergleich der Isotopie von Marmorproben mit mehr als 3 Gew% Dolomit erlaubt oft eine sichere Unterscheidung (Abbildung 82). Der Dolomitanteil in der Herakleia-Probe stammt aus einer dunklen Bänderung. Die hier nicht erfassten Dolomitbänder der milesischen Marmore zeigen häufig charakteristische Boudinagen, wie sie in anderer Form auch auf Marmara beobachtet werden können.

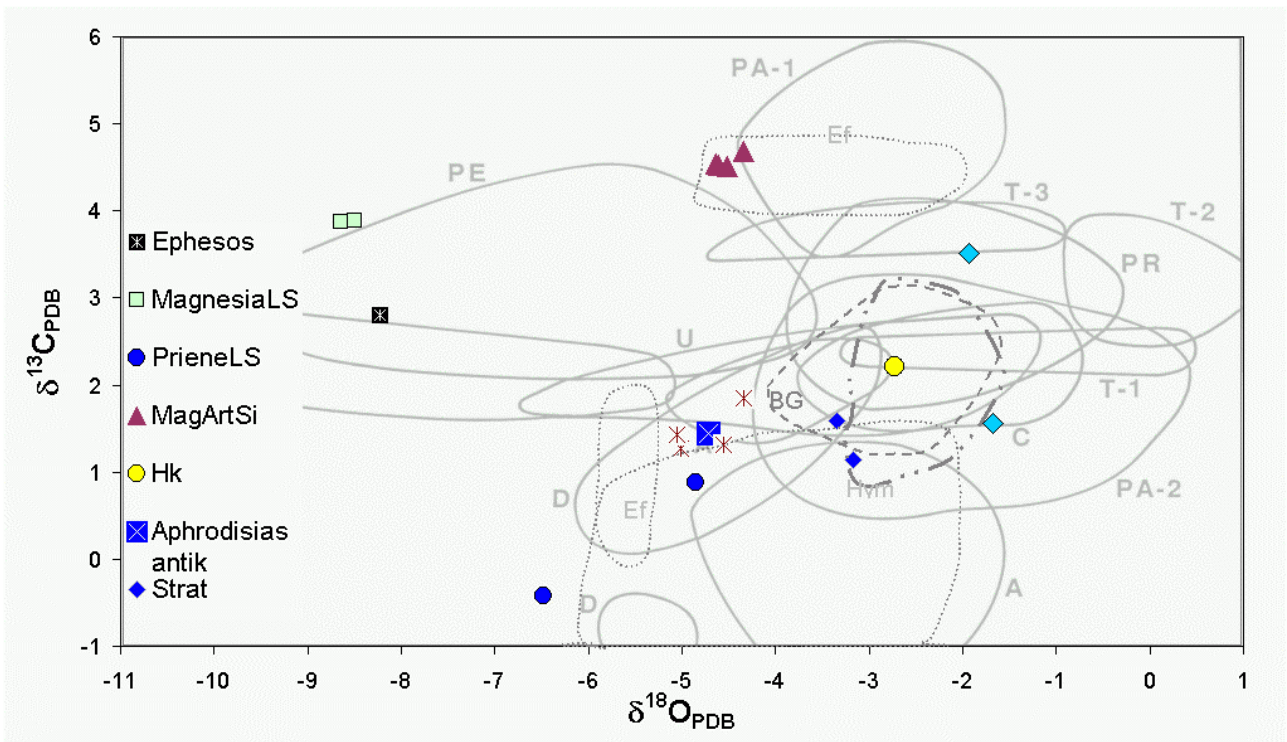


Abbildung 82: Isotopie der Marmorproben mit mehr als 3 Gew% Dolomit (XRD). Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), vgl. Abbildung 13

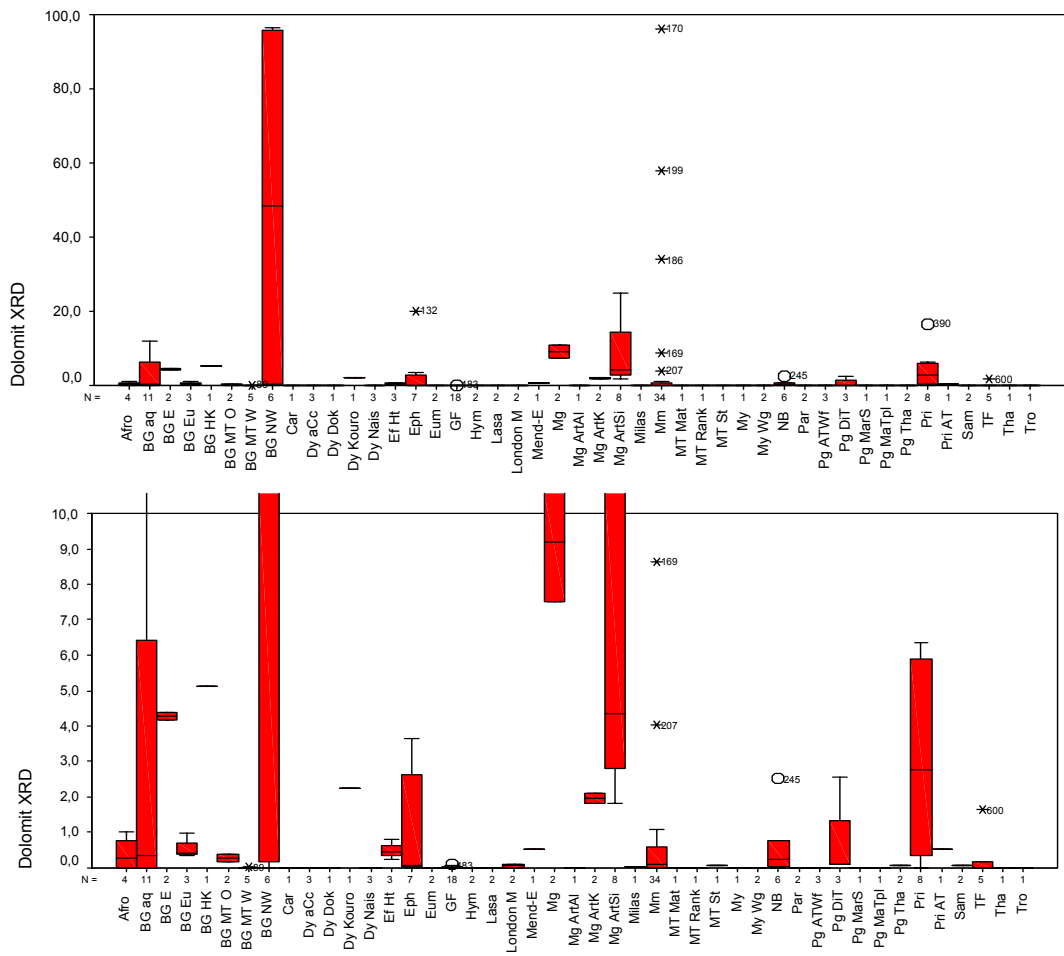


Abbildung 83: Dolomitgehalte (Gew%) mit Ausreißern und Extremwerten der untersuchten Marmore von Lagerstätten und antiken Objekten. Untere Abbildung Ausschnitt bis 10 Gew% Dolomit.

Allerdings kommen auch auf Marmara heute im Abbau stehende rein dolomitische weiße eisenarme Marmore vor, die jedoch sehr feinkörnig sind und deren antike Verwendung bisher nicht nachgewiesen werden konnte. Wenn in Abbildung 82 auch nur durch eine Probe mit starker Verarmung der Sauerstoffisotopie belegt, kommen in den Marmoren von Ephesos dolomitische Partien meist als feinkörnige Bänderungen oder Kristalloblasten vor, denen, soweit erkennbar, die Sprödheit und Risse der Boudinagen der Brüche von Milet Ost und Marmara fehlen. Unterschiede zwischen den dolomitischen Komponenten von Priene und Stratonikeia sind bereits oben beschrieben worden. Die dolomitischen Marmore am NW-Ufer des Bafa-Sees gegenüber der Insel Burgass Adasi unterscheiden sich von den prienischen durch ihre höheren Gehalte an SEE, Y, Mn und Fe.

Bei den Marmoren von Magnesia/M. ist der Dolomit meist unregelmäßig verteilt, sie weisen

eine höhere Kohlenstoffisotopie auf und lassen sich auch deswegen von ephesischen Marmoren nicht immer sicher unterscheiden, zeigen allerdings eher einen leicht gräulichen Farbton.

5.4.6 Lagerstätten mit starker Geruchsbildung

Grundsätzlich kann in allen Lagerstätten mit organischen Residuen beim Zermahlen ein mehr oder minder starker Geruch z.B. nach faulen Eiern (H_2S) auftreten (s. Kapitel 4.12). Besonders ausgeprägt ist dies bei hymettischen und prokonnesischen Marmoren, die aber schon aufgrund ihrer Korngröße leicht zu unterscheiden sind. Auch die ebenfalls unschwer identifizierbaren grobkörnigen Marmore von Thasos-Aliki weisen trotz ihrer weißen Farbe regelmäßig dieses flüchtige Merkmal auf, das nur erfasst werden kann, wenn das zu seiner Detektion geeignete Sinnesorgan in engsten räumlichen und zeitlichen Zusammenhang mit seinem Auftreten gebracht wird.

6 Wichtige Marmorlagerstätten, ihre Randbedingungen und Charakteristika

In diesem Kapitel werden relevante – zumeist von uns beprobte – Marmorlagerstätten exemplarisch behandelt (s. Tabelle und Karten in Kapitel 4.1). Es hat sich gezeigt, dass alleine mit den Marmorlagerstätten im engeren Untersuchungsgebiet keine hinreichende Herkunftsbestimmung geleistet werden kann. Umgekehrt würde es aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen, alle relevanten Lagerstätten in gleicher Ausführlichkeit zu behandeln. Zudem konnten einige Marmorlagerstätten, deren Bedeutung erst im Rahmen der Provenienzanalyse deutlich wurde, weder aufgesucht noch hinreichend beprobt werden. Beträchtliche Mengen an Probenmaterial diverser Lagerstätten harren zudem noch zukünftiger Analyse und Auswertung.

Wo möglich, wurden Vorarbeiten anderer Forscher einbezogen. Doch war manche – wie sich aus diesen Arbeiten ergibt – relevante Primärliteratur (MONNA & PENSABENE 1977; PENSABENE & ARTHUR 1985; YILMAZ 2002) nicht eingesehen werden.

Gelegentlich erwies es sich als sinnvoll, einige Lagerstätten erst im Zusammenhang mit der Herkunftsbestimmung der Museumsobjekte – auch im Vergleich zu anderen potentiellen Bezugsquellen – ausführlicher zu diskutieren.

Einige der Marmorvorkommen sind auf das Engste mit antiken Stätten verbunden, die teilweise umfangreicher beschrieben werden, insbesondere wenn dies dem Aufspüren möglicher Beziehungen zu Pergamon und den antiken Stätten im unteren Mäandertal dient.

Die Darstellung der Lagerstätten ist wesentlich nach regionalgeologischen Kriterien in vier große Blöcke gegliedert (s. geologischer Überblick mit wichtigen Marmorvorkommen in Kapitel 2.3 und 2.4):

- a) Die Lagerstätten der Pontiden: Marmara (antik Prokonnesos, das in dieser Arbeit eine Sonderstellung einnimmt), Thasos, Lesbos (Geologie und Werksteine im Kozak werden im Zusammenhang mit dem antiken Pergamon behandelt)
- b) Die Lagerstätten der südlichen Menderes-Metakarbonatsequenz und der Afyon-Bolkadağ Zone

- c) Attisch-Kykladischer Komplex mit den wichtigsten hellenistischen Lagerstätten von Ephesos bis Pentelikon
- d) Sonstige (Carrara, Wunsiedel).

Eine zusammenfassende Übersicht petrographischer und geochemischer Unterscheidungsmerkmale wurde in Kapitel 5 gegeben, ein isotopischer Überblick erfolgt in Kapitel 7.2.

6.1 Marmara (Prokonnesos)

Auf der Insel Marmara (siehe Abbildung 16) befinden sich noch heute in Steinbrüchen und Freilichtmuseen gesicherte antike Objekte aus römischer und byzantinischer Zeit in einem der weltweit größten modernen Marmor-Gewinnungsgebiete (geschätzte Reserven 1,2 Milliarden Kubikmeter).



Abbildung 84: Antike Nekropole bei Saraylar, Marmara, mit typischen Sarkophagen

Wenn auch nicht die weißesten und edelsten Marmorvarietäten aufweisend, versetzten deren Eigenschaften, Verfügbarkeit und die Küstennähe (leichterer Transport über See als zu Land) Marmara schon in vorrömischer Zeit in die Rolle eines antiken "global players" und sorgten für

ein weites Verbreitungsgebiet prokonnesischer Marmore. Mit 40 Dinar je Kubikfuß im Edikt des Diokletian (301 u.Z.) gehörte er zu den preiswertesten Marmoren überhaupt.



Abbildung 85: Überrest antiken Abbaus mit Schrämspuren, Doğu Camlik bei Aksoy Kol. (3), Marmara



Abbildung 86: Freigelegte antike Säule am Rand modernen Marmorabbaus, Marmara



Abbildung 87: Hafen von Saraylar/Marmara mit Wellenbrechern aus Marmorblöcken. Im Hintergrund sind Spuren des Marmorabbaus erkennbar

In den letzten Jahren wurde in zahlreichen Publikationen vorwiegend zu archäologischen und archäometrischen Fragestellungen die früher

unterschätzte Rolle der prokonnesischen Marmore aufgeklärt (MONNA & PENSABENE 1977; CORDISCHI *et al.* 1988; GNOLI 1988; MELLO *et al.* 1988b; GNOLI & BORGHINI 1998; ATTANASIO 2003). In der 1000 polierte Marmorplatten enthaltenden Corsi-Kollektion (CORSI 1825, 1827; NAPOLEONE & CANALI 2001) sind sie kaum vertreten bzw. wurden wie auch später oft mit hymettischen Marmoren verwechselt. Lepsius (1890) erwähnt sie lediglich mit der bedauernden Feststellung mangelnder Gelegenheit, die prokonnesischen Brüche aufzusuchen.



Abbildung 88: Byzantinische Marmorstatue in einem Freilichtmuseum bei Saraylar/Marmara. Links im Bild Frau Asgari

Insbesondere der türkischen Archäologin Nuşin Asgari, die uns auf Marmara geführt hatte, kommt das Verdienst zu, viele dort liegengeliebene antike Objekte vor der Zerstörung durch den modernen Marmorabbau in Freilichtmuseen gesichert zu haben und die Bedeutung prokonnesischen Marmors sowohl einem breiterem Fachpublikum als auch der türkischen Öffentlichkeit und selbst den Marmorproduzenten bewusst gemacht zu haben (z.B. ASGARI 1977, 1978, 1988, 1992; ASGARI & MATTHEWS 1995).

Aufgrund ihrer Nähe zu Kyzikos, das auch als Verwaltungszentrum und Zwischenlager für die gebrochenen Marmorblöcke gedient haben könnte, werden die prokonnesischen Marmore gelegentlich auch als kyzikenische bezeichnet (BLÜMNER 1875).

Die Verbreitung prokonnesischer Marmore zur römischen Kaiserzeit wurde – neben Rom⁴⁹ und anderen Städten in Italien – bis nach Rumänien (MÜLLER *et al.* 1996), Palästina (PEARL *et al.* 1990; FISCHER *et al.* 1998; FISCHER 2003), Spanien und Südfrankreich (GAGGADIS-ROBIN *et al.* 2003) nachgewiesen. Ein weiterer Verwendungsschwerpunkt war das byzantinische Konstantinopel (SODINI 2002) und später das mittelalterliche Venedig (wahrscheinlich z.B. gebänderte Inkrustationen am St. Markusdom in

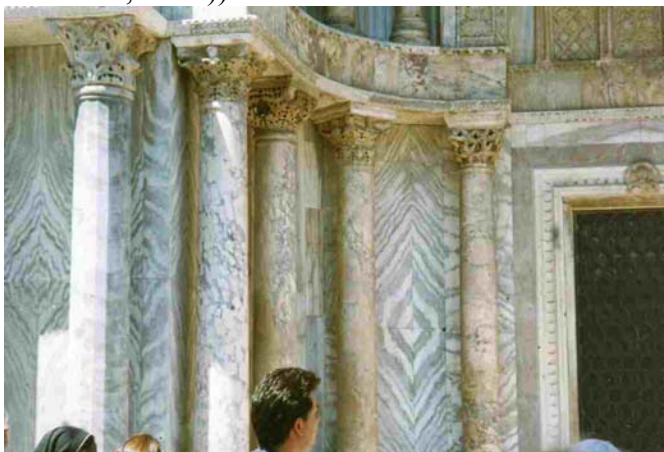


Abbildung 89: Muster aus stark gebänderten Marmorplatten an der Fassade des St. Markusdom in Venedig



Abbildung 90: Prokonnesischer Marmor im Museum von Tekirdağ. Im Vordergrund V. Kästner, Archäologe der Berliner Antikensammlung

Hinweise für seine Verwendung anhand äußerer Merkmale fanden wir auf dem Weg von Istanbul nach Marmara in Thrakien (z.B. Museum von Tekirdağ, Abbildung 90) sowie südlich von

⁴⁹ Bei vielen der früher als hymettisch angesprochenen Marmore in Rom ist unterdessen ihre prokonnesische Herkunft erwiesen (ATTANASIO 2003).

Marmara in Cannakale und den weiter unten behandelten antiken Stätten Troja, Pergamon, Ephesos und Milet.

Schon die bloße makroskopische Ansprache bekräftigte die nun auch durch mikroskopische und geochemische Untersuchungen gestützte Annahme, dass der Marmor des Pergamonaltars, des noch älteren Frieses des Demetertempels (281-263 v.u.Z.) und weiterer Objekte in Pergamon von hier stammt. Ebenfalls im 3. Jh. v.u.Z. ist prokonnesischer Marmor offensichtlich für den Thron des Potamon auf Lesbos (eigene Beobachtung nach äußeren Merkmalen, Abbildung 134) und in Troja (eigene Untersuchungen für den Athentempel sowie ZÖLDFÖLDI & SATIR (2002)) verwendet worden. Somit ist der Beginn des Abbaus und Exports prokonnesischen Marmors mindestens auf das 3. Jh. v.u.Z. zu datieren – und nicht erst in die römische Kaiserzeit, wie häufig geäußert wurde. Für zwei der Sieben Weltwunder soll prokonnesischer Marmor noch früher Verwendung gefunden haben: im 4. Jh. v.u.Z. in der Fassade des Mausoleums von Halikarnassos⁵⁰ (GOODCHILD JOHN & WOOD 1889; SMITH 1900; MATTHEWS 1988) und im 6. Jh. v.u.Z. im Artemision von Ephesos (ATTANASIO 2003). Allerdings scheint – soweit die bisher zugänglichen Literaturangaben diesen Schluss zulassen – die Zuordnung für das Mausoleum lediglich auf Isotopendaten zu beruhen⁵¹, während für das Artemision von Ephesos eher lokale Marmore (zuerst aus den Brüchen von Belevi und später von Aytekin) Verwendung gefunden haben dürften (KOLLER *et al.* 2003; MUSS *et al.* 2003).

Möglicherweise gehen diese prokonnesischen Herkunftangaben auf Überlieferungen von Vitruv und Plinius zurück: Artemistempel in Ephesos (Vitr. X, 7,15), Inkrustationen am Palast des

⁵⁰ „Es handelt sich um die ersten Platten aus Marmor von Prokonnesos, die gesägt und geschmückt im Denkmal des Mausolos in Halikarnassos verwendet wurden.“ (MANNONI & MANNONI 1980, S. 142).

⁵¹ Die wertvollsten Stücke des Mausoleums befinden sich im Britischen Museum in London. Zuletzt wurde für das Mausoleum alleine aufgrund isotopischer Analysen nicht nur prokonnesischer Marmor postuliert, sondern eine Vielzahl weiterer Marmorquellen: Pentelikon, Paros, Iasos, Milas, Herakleia und Ephesos (JEPPESEN 2002)

Mausolos zu Halikarnass (Vitr. II, 8, 10 und Plin. XXXVI, 46), Heraklestempel auf Akropolis von Heraklea am Pontus, `nach Memnon` (BLÜMNER 1875, S. 37).

Heute sind Marmorabbau und Weiterverarbeitung auf Marmara trotz des großen Abbau- und Exportsvolumens noch weitgehend mittelständisch organisiert. Seine charakteristisch gebänderten Verarbeitungsprodukte werden unter dem Handelsnamen „Marmara Beyaz“ oder „Marmara White“ für sanitäre Einrichtungen, Gartenanlagen und Architektur in Form von Fliesen, Platten und Gebrauchsgegenstände auf dem in- und ausländischen Markt vertrieben.



Abbildung 91: Gesägte Platten in lokalem Marmorbetrieb (Dincer-Werk) auf Marmara

Jedenfalls kann Frau Asgaris Verdienst gar nicht hoch genug gewertet werden, viele der Steinbruchbetreiber und dort Beschäftigten dazu bewegt zu haben, die in den Abbaugebieten noch immer reichlich vorhandenen antiken Objekte in Freiluftmuseen zu sichern.

6.1.1 Geologischer Überblick

Marmara ist Teil der Sakarya-Zone, einer Subzone der Pontiden. Leider ist die verfügbare englische oder deutschsprachige Quellenlage zur Geologie Marmaras im Vergleich zum Menderes-Massiv ausgesprochen dürftig. Dies obwohl

– nicht zuletzt wegen der Erdbebenhäufigkeit und der großen ökonomischen Bedeutung des Marmorabbaus für die Türkei – von türkischen Autoren (z.B. YÜZER *et al.* 1992; YÜZER *et al.* 2003) sehr detaillierte Untersuchungen vorgenommen wurden.

Einen geologischen Überblick Marmaras und der Kapıdağ-Halbinsel gibt AKSOY (1995):

Marmara und die Kapıdağ-Halbinsel werden von sieben lithodemischen Einheiten gebildet. Sie bestehen aus präpermischen Metamorphiten, die in verschiedenem Grade metamorph überprägt und deformiert wurden, sowie aus paläogenem granitoidem Gestein. Älteste Einheit sind die Gündogdu-Metamorphite, die einem Kontinentalrand vom Atlantiktyp aufgelagert wurden. Sie setzen sich aus Glimmerschiefern, Kalkschiefern und Marmoren zusammen. Die Gündogdu-Metamorphite werden tektonisch vom gleichaltrigen Erdek-Komplex überlagert. Letzterer besteht aus zwischengelagerten Metaserpentiniten, Metapyroxeniten, Metagabbros, Metabasalten, Amphiboliten, Amphibolschiefern und Grünschiefern, die sich aus pelitischen, semipelitischen und psammitischen Gesteinen sowie Kalksteinolistolithen gebildet haben. Die auf einer stabilen Schelfumgebung abgelagerten Marmara-Marmore liegen diskordant dem Erdek-Komplex auf. Ihm folgt der flyschhaltige Saraylar-Komplex... Er besteht aus Lagen von Tonstein, Sandstein, Konglomeraten und Kalksteinen in einer ursprünglichen Turbidit-Fazies mit Marmorblöcken und basischem bis intermediären Metavulkaniten. All diese Einheiten wurden noch vor der Metamorphose von dem kalkalkalinen İsađađı-Metagranodiorit intrudiert, der zahlreiche Metaaplite, Metapegmatite und Quarzgänge hervorgebracht hat.

Mit dem Aufstieg der Region vor dem Perm kamen die Metamorphose und sie begleitende Prozesse zum Stillstand. Kalkalkiner Magmatismus während der alpinen Orogenese brachte die Ocaklar- und Çeltikçi-Granitoide hervor.

In einer weiteren Arbeit (AKSOY 1999) werden drei Metamorphosephasen unterschieden, zwei von ihnen als Teil eines einzigen progressiven regionalmetamorphen Zyklus, und die dritte durch eine retrograde Metamorphose geprägt. Der Metamorphosegrad nimmt von N nach S zu und bringt eine Grünschiefer-, Epidot-Amphibolit- sowie Amphibolit-Fazies hervor. Sie entwickelten sich parallel zu einer ENE-WSW verlaufenden D₂-Faltenachse. Indexminerale lassen auf Bildungsbedingungen zwischen 3 und 6 kbar und 400 bis 600 °C schließen. Insgesamt haben die Gesteine synchron mit der Regionalmetamorphose 4 Deformationsphasen erfahren (AKSOY 1999).

Geophysikalische Prospektion ergab, dass die gesamte Marmara-Meer-Region infolge zweier Hauptstörungssysteme in 5 Blöcke zergliedert wird (WONG *et al.* 1995). Sie zeigen in rascher Folge Unterschiebungen sowie vertikale und möglicherweise auch untereinander rotierende Bewegungen, und sind Ergebnis der Kompressionsbewegung zwischen Eurasien und Afrika, die sich u.a. in von Erdbeben begleiteten Bewegungen entlang der North Anatolian Fault Zone niederschlägt (s.a. YALTIRAK 2002).

UZ & TANYOLU (1985) untersuchten geochemisch die Zusammensetzung granitischer (Aplite bis Diorite) und metamorpher silikatischer Gesteine mit maximal 7 Gew% CaO.

6.1.2 Merkmale prokonnesischer Marmore
Das nördliche Drittel der Insel Marmara besteht fast vollständig aus Marmor, im Südteil dominieren Schiefer, während der Zentralteil von beträchtlichen magmatischen Intrusionen (Granit) gebildet wird.

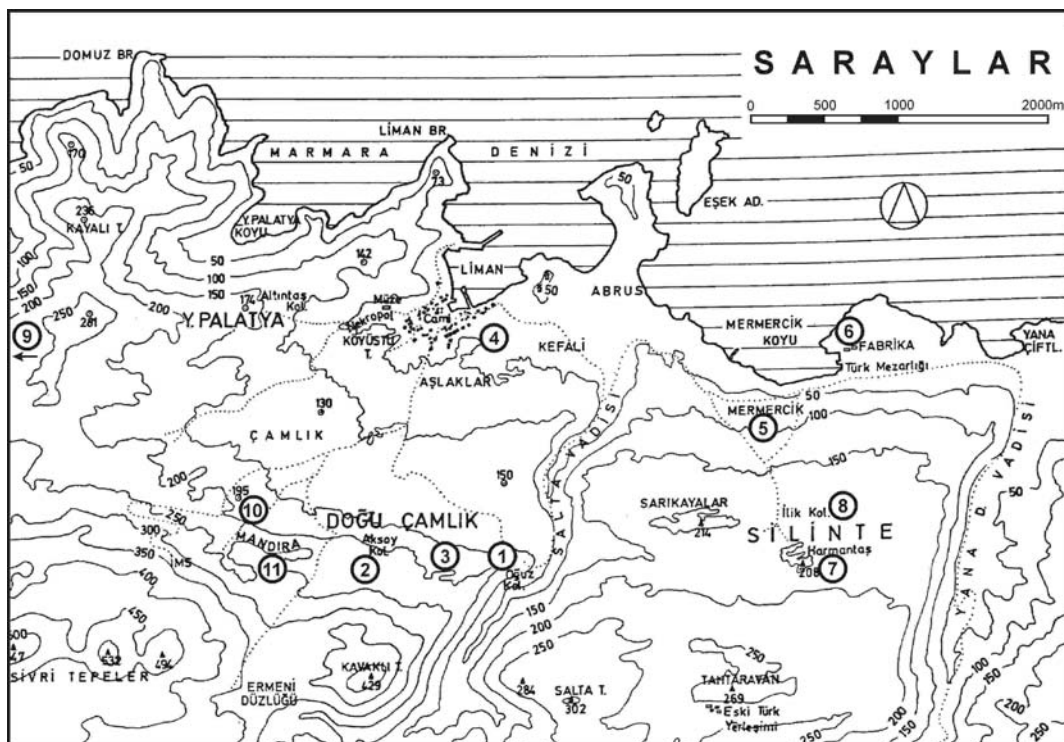


Abbildung 92: Marmorabbaugebiete im NE-Teil Marmaras. Zahlen in Kreisen stellen Probenentnahmepunkte im März 2000 dar. Karte aus ASGARI & MATTHEWS (1995)

Vom nördlichen Marmorrevier sind in Abbildung 92 Probenentnahmepunkte rund um die Bergbausiedlung und Hafenstadt Saraylar (bei 4) eingetragen. In dem dargestellten Areal lassen sich die große Ausdehnung der Brüche und die tektonische Störungen N-S/E-W nachzeichnenden Talsysteme in dem bis 500 m hohem gebirgigen Gelände erkennen. Fast überall befinden sich in Freilichtmuseen gesicherte Objekte antiken Abbaus. Bei Harmantaş-Silinte (7) steht eine unvollendete Riesensäule (Abbildung 96), weiter westlich wurden Schieferproben entnommen; im Bereich von Doğu Camlik (1-3) befindet sich der Marmor mit dem unten beschriebenen Isotopenfeld PR-2, bei Mandira die Lamprophyrgänge.

Äußere Merkmale

Eine für die Erklärung der großen Marmorächtigkeit wichtige Beobachtung ist, dass die für Marmara-Marmore typischen **dunklen Bänderungen** bei geeignetem Anschnitt eine isoklinale Faltung des Marmorpakets erkennen lassen (Abbildung 93). Der im Westen der Insel gesteinsbildend auftretende, feinkörnige Dolomit kommt im mittleren und östlichen Teil besonders um die zentrale Bergbausiedlung Saraylar verbreitet in separierten Lagen vor, die häufig boudiniert sind (Abbildung 94). Bei der Herstellung der Pergamonaltar-Friese sind solche Marmore aus Qualitätsgründen nicht verwendet worden, wohl aber der schwach gebänderte Typ. Charakteristisch für die Marmara-Lagerstätte sind auch die **erheblichen Block-**

größen, die durch ein vorwiegend Ostwest, Nordsüd subvertikal verlaufendes – orthogonales – Trennflächensystem (Abbildung 95) vorgegeben sind, das in unterschiedlichem Ausmaß von seit dem Tertiär entstandenen Karstbildungen begleitet wird.



Abbildung 93: Steinbruchwand von rezentem Abbau bei Mandira, im Block oben isoklinale Faltung



Abbildung 95: Blick auf modernen Marmorsteinbruch westlich von Silinte, der sich entlang einer Ost-West verlaufenden Störung auf Marmara erstreckt

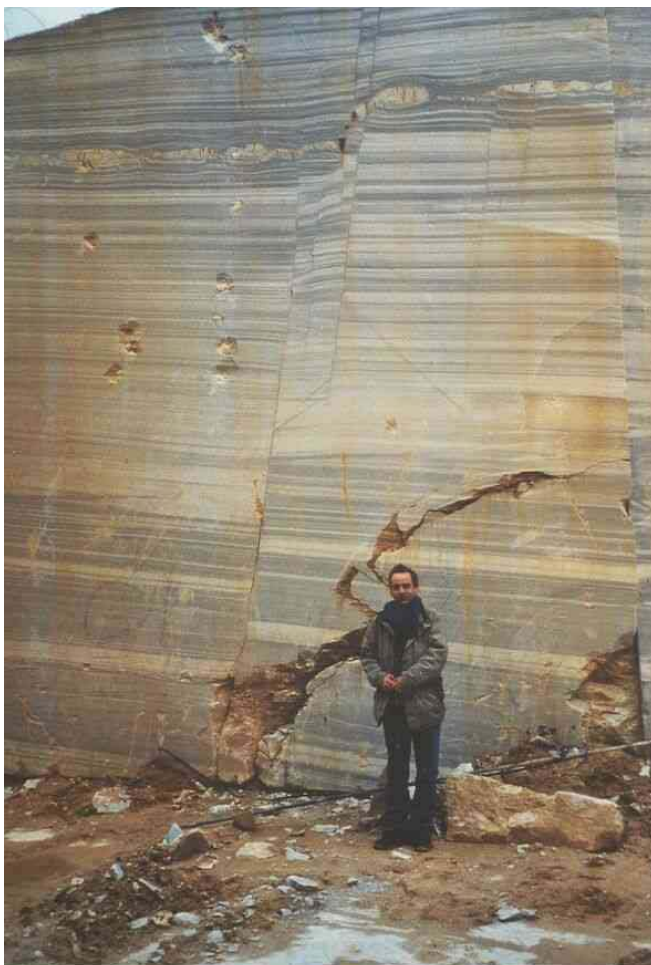


Abbildung 94: Steinbruchwand N von Salta Tepesi mit extremer dunkler Bänderung, Boudinage an Dolomitbändern und tektonischen Abschiebungen



Abbildung 96: Halb herausgearbeitete byzantinische Riesensäule im Bereich rezenten Abbaus bei Harmantaş-Silinte, Marmara

Diese mit starken Eisenimprägnationen und Verfärbungen einhergehenden Karstbildungen haben eine ausgesprochen negative Auswirkung auf die nutzbaren Lagerstättenbereiche (s. Abbildung 111 und Abbildung 112 bei der Betrachtung geochemischer Variationen). Ansonsten liegen die Kluftabstände aber zum Teil bei über 10 Metern und erlauben den Abbau großer Blöcke mit beträchtlichen Längen.



Abbildung 97: Aus einem Block prokonnesischen Marmors gearbeitete Portalschwelle der Roten Halle von Pergamon

So wurde die 7,1 m lange und geschätzte 41 Tonnen schwere Schwelle am Eingangportal der zur römischen Kaiserzeit errichteten Roten Halle in Pergamon aus einem einzigen Block prokonnesischen Marmors gearbeitet (Abbildung 97).

Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist der **Geruch** nach H_2S , der schon bei der Zerstörung weniger Kristalle deutlich wahrnehmbar auftritt. Dies gilt sowohl für die dunkleren Partien als auch für die hellweißen (N9) Calcit-Proben. Nur bei den – wohl in der Antike nicht abgebauten – weißen Dolomitmarmoren konnte er nicht wahrgenommen werden. Seltener und schwächer taucht das gleiche Phänomen bei den grobkörnigen Marmoren von Thasos-Aliki auf, aber fast immer bei den sehr feinkörnigen hymettischen Marmoren. Letztere sind bei Vorherrschen eines grauen Farbtons meist unregelmäßig gebändert. Die römischen Steinmetze bezeichneten sie aufgrund des bei der Bearbeitung auftretenden Geruchs als *marmo cipolla* (= Zwiebel), ein Name der auch auf die prokonnesischen Marmore übertragen wurde, bis sich im

nächsten Schritt allgemein für dunkler gebänderte Marmore die Bezeichnung *hymettisch* einbürgerte. Diese Übertragung einer phänomenologischen Bezeichnung auf ein Herkunftsgebiet führte wiederum dazu, dass bis in die 1970er Jahre die weite Verbreitung prokonnesischer Marmore gerade in der römischen Welt unterschätzt wurde (Angaben aus ATTANASIO 2003). Dabei hätte schon die zusätzliche Berücksichtigung der Korngrößenunterschiede eine solche kulturell geprägte Verwechslung ausschließen können.

Trotz des relativ einheitlichen petrographischen Bildes zeigen verschiedene Lokalitäten dieses ausgedehnten Lagerstättengebietes einige Variationen, die über die von Ost nach West zunehmenden Dolomitgehalte hinausgehen.

Mikroskopische Merkmale

Auch unter dem Mikroskop lassen sich die auffälligen Marmara-typischen Merkmale nachverfolgen: parallele **dunkle Bänderung**, **bimodale Korngrößenverteilung** mit **maximalen Korngrößen** zwischen 2 - 3,5 mm sowie Einschlüsse, bei deren mechanischer Zerstörung nach H_2S riechende Gasphasen freigesetzt werden. **Deformationserscheinungen** der mesozoischen Marmore mit **heteroblastischem Gefüge**, feinkörnigen Zerreibseln, gezahnten Korngrenzen, zahlreichen Zwillingslamellen und anomaler optischer Zweiachsigkeit zeigen postkristalline Dynamometamorphose an.

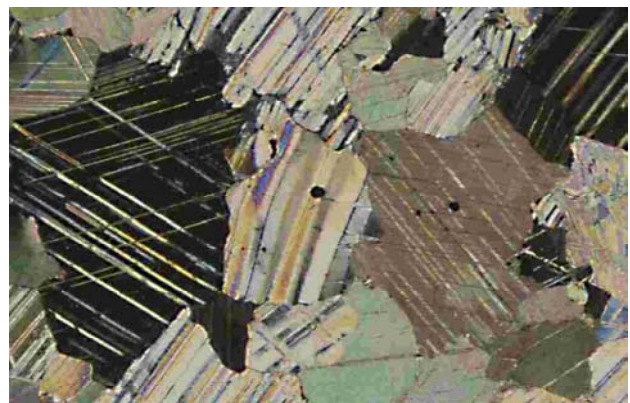


Abbildung 98: Dünnschliffaufnahme prokonnesischen Marmors (MmDC8), N+, kurze Kante 2,4 mm

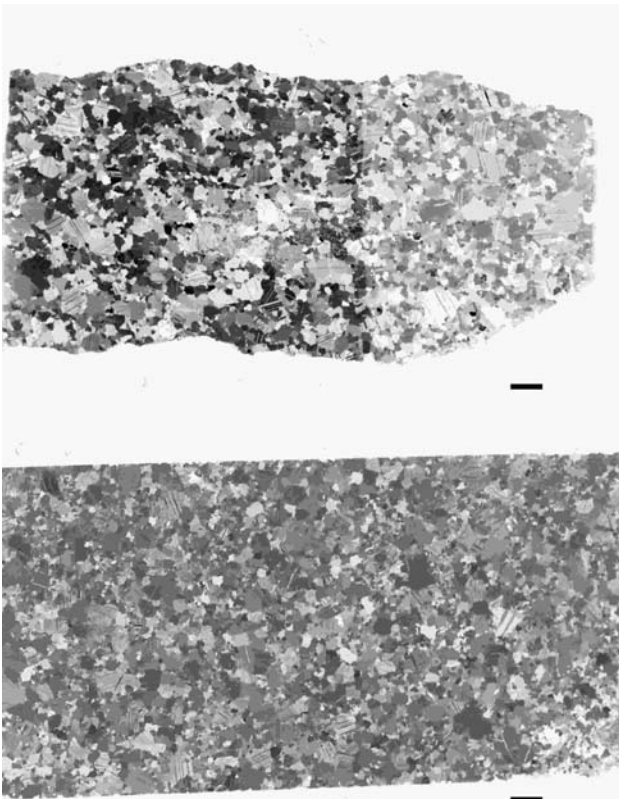


Abbildung 99: Marmor von Doğu Camlik (o., MmDC7) und von Platte 92 des Pergamonaltars (u.). Der helle Saum rechts oben entstand nach Anfärbung mit Alizarin Rot, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Abgesehen von den Hauptphasen **Calcit** und untergeordnet Dolomit kommen in den prokonnesischen Marmoren nur geringe Anteile an **akzessorischen Mineralien** vor: durchgängig detritischer **Quarz**, opake, oft submikroskopische Poren und **kohlige Einschlüsse** – gelegentlich als Graphit ausgebildet – sowie Pyrit und Magnetit, sehr viel seltener hingegen Hellglimmer. Andere in der Literatur beschriebene Mineralphasen wurden in den Proben nicht aufgefunden. Die mit den submikroskopischen Einschlüssen in Zusammenhang stehenden Ursachen des charakteristischen Geruches wurden im Kapitel 4.12 bereits ausführlich diskutiert.

Höhere opake Anteile sind teilweise für das Auftreten der **dunklen Bänderungen** verantwortlich. Häufig sind im Bereich der dunklen Bänderungen jedoch nur unwesentlich erhöhte Gehalte an akzessorischen Mineralien feststellbar, aber oft treten in ihnen erst unter dem Mikroskop erkennbare feinkörnigere Bereiche auf (Abbildung 100). Möglicherweise haben höhere Anteile submikroskopischer Einschlüsse dort das Kornwachstum dermaßen gehemmt, dass die Häufung von Korngrenzen in diesen fein-

körnigen Bereichen den Lichtdurchgang schwächt und den dunkleren Farbton mitverursacht.

Die dunklen Bänderungen sind gelegentlich auch mit höheren **Dolomitanteilen** assoziiert. Diese schlagen sich aber nicht immer in makroskopisch erkennbaren Gefügeunterschieden nieder. So erscheinen die Korngrößen einer gesägten Platte eines gebänderten Marmors im Handstück über den gesamten Bereich einheitlich, während im Dünnschliff deutlich feinkörnigere Lagen erkennbar sind (Abbildung 101), für die pulverdiffraktometrisch teilweise über 50 Gew% Dolomit ermittelt wurden.

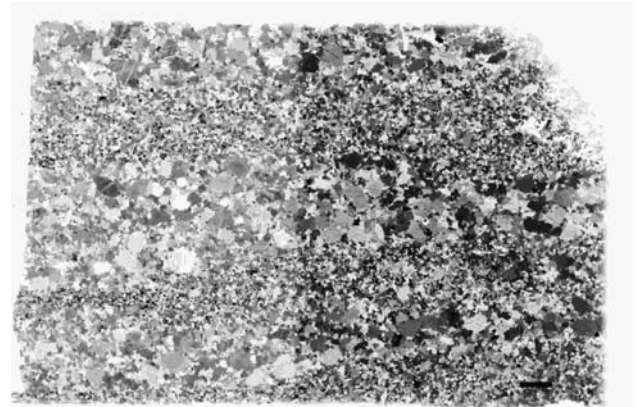


Abbildung 100: Die feinkörnigen Lagen korrespondieren mit einer schwach dunklen dolomitfreien Bänderung in einem hellweißen Marmor (Mermercik, MeMe1), N+, Maßstabsbalken 2 mm

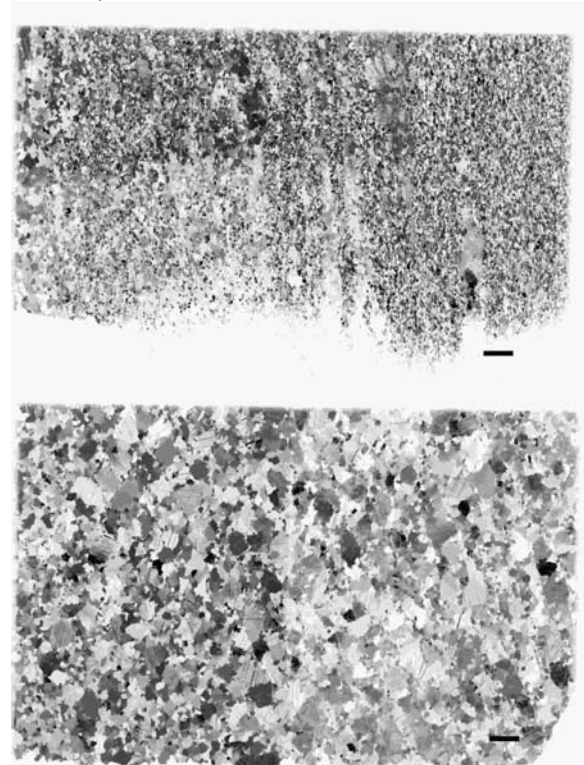


Abbildung 101: Feinkörnige Bänderung mit über 50 Gew% Dolomit (o. Rem1_2) in einer hellen Marmorplatte (u. Rem1), N+, Maßstabsbalken 2 mm

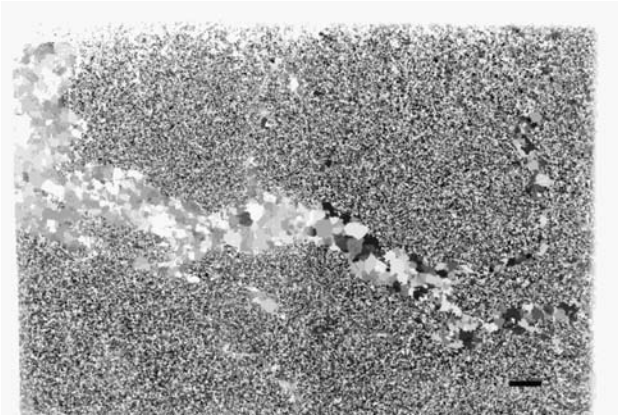


Abbildung 102: Feinkörniger, hellweißer Dolomitmarmor (ohne Quarz, Glimmer, opake Min.) mit Calcitband ohne Deformationserscheinungen (Dincdo)

Umgekehrt kann es auch vorkommen, dass feinkörnige, rein dolomitische akzessorienfreie Marmore von Calcitbändern durchzogen werden (Abbildung 102). Bei diesen handelt es sich wahrscheinlich um sekundäre calcitische Kluftausheilungen.

Diese makroskopisch nicht immer erkennbaren Variationen haben möglicherweise dazu beigetragen, dass in der Literatur widersprüchliche Angaben zum Dolomitgehalt prokonnesischer Marmore zu finden sind, wobei Dolomit zumeist ausgeschlossen wird. Manche Angaben können aber die Gehalte in für antike Objekte und Zuordnungen relevanten Bereiche auch unnötig nach oben treiben. Bei den zahlreichen untersuchten antiken Objekten prokonnesischer Herkunft wurden maximal 1,1 Gew% Dolomit (dunkel gebänderte Partie des Telephosfrieses) bzw. 0,72 Gew% Mg (Hafentherme Ephesos) gemessen. In jeden Fall sind Aussagen zum Dolomitgehalt prokonnesischer Marmore zwischen mindestens 2 und höchstens 8 Gew% irreführend.

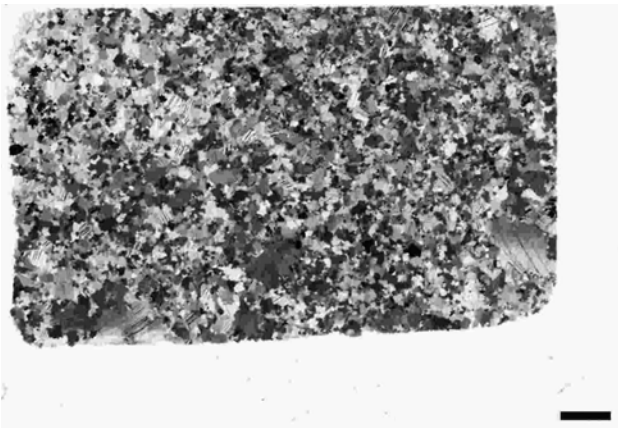


Abbildung 103: Mustafa-Kemal-Paşa-Beyaz-Marmor mit größeren Calcitindividuen in feinkörnigerer Matrix, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Das sehr heterogene Korngefüge der Marmara-Marmore findet sich auch im Dünnschliff einer von Mümtaz Colak (Dokuz Eylül Üniversitesi Izmir) geschickten Marmorprobe aus dem modernen Steinbruch Mustafa Kemal Paşa wieder. Er gehört der gleichen regionalgeologischen Einheit wie Marmara an, der Sakarya-Zone, ist aber weiter im Landesinneren auf der Bigahalbinsel gelegen⁵². Die polierte Platte wirkt feinkörniger und zeigt ein auffälliges, durch bis 2 cm große Calcitindividuen gebildetes Muster. Im Dünnschliff ist ebenfalls ein geringerer Anteil größerer Kristalle (MGS 2-3 mm, AGS 0,4 mm) als bei den prokonnesischen Marmoren feststellbar; all dies deutet auf einen schwächer ausgeprägten Metamorphosegrad hin. Die Lagerstätte wurde von uns nicht aufgesucht und die Probe auch nicht weitergehend untersucht.

Geochemische Merkmale

Geochemisch zeichnen sich die weißen calcitischen Marmore – wobei die zahlreichen Proben des Pergamonaltars einbezogen wurden – durch insgesamt niedrige Gehalte an Spurenelementen aus (Mn 5-10, Fe 10-40, Sr 115- 266 ppm, Fe/Sr 0,06-0,28). Die Mg-Gehalte zwischen 0,25-1,1 Gew% sind in den dolomitischen Lagen selbstverständlich wesentlich höher. Die im Vergleich zu den Marmoren aus dem westlichen Bruchgebiet von Paros niedrigeren Fe und Mn-Gehalte sind ein nützliches geochemisches Unterscheidungsmerkmal (Abbildung 104). Noch deutlicher fällt die Diskriminierung bei Verwendung des Fe/Sr-Verhältnisses aus ((Abbildung 71). Eingeschränkt gilt letzteres auch für Aphrodisias (Abbildung 73).

⁵² Nach persönlicher Mitteilung von J. Zöldföldi lassen sich die prokonnesischen Marmore petrographisch, isotopisch und geochemisch nicht von denen anderer Steinbrüche – teilweise mit antiken Abbauspuren – auf der sich südlich von Marmara erstreckenden Biga-Halbinsel unterscheiden, besonders von Orhangazi. Wenn überhaupt, sei eine Differenzierung lediglich mittels Sr-Isotopenanalyse möglich. Leider liegen zur Überprüfung dieser Hypothese bisher weder Messergebnisse von Probenmaterial aus Marmara und von Objekten der Antikensammlung vor, die wir im März 2003 nach Tübingen schickten, noch haben wir Probenmaterial von der Biga-Halbinsel erhalten.

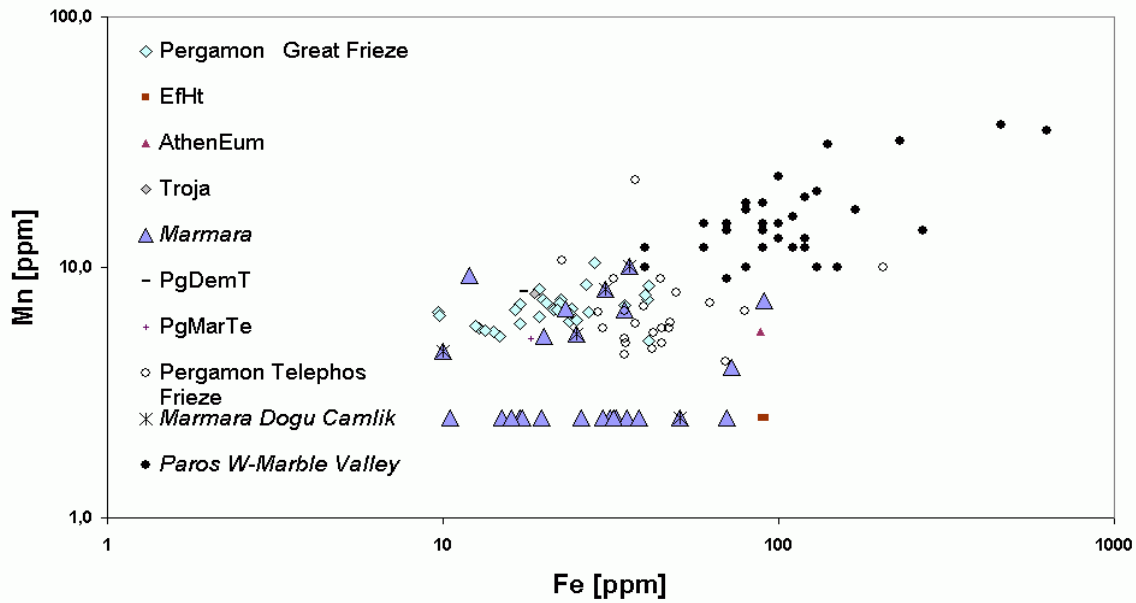


Abbildung 104: Fe/Mn-Korrelationsdiagramm prokonnesischer Marmore (Steinbrüche und antike Objekte) und von Marmoren aus dem Westlichen Marmortal von Paros (Werte aus Messungen von GERMANN et al. (1988). Letztere weisen i.d.R. höhere Mn- und Fe-Gehalte auf. Bei zahlreichen prokonnesischen Marmoren liegen die Mn-Gehalte unter der ICP-OES-Nachweisgrenze von 2,5 bzw. 5 ppm (je nach Verdünnung der Lösungen).

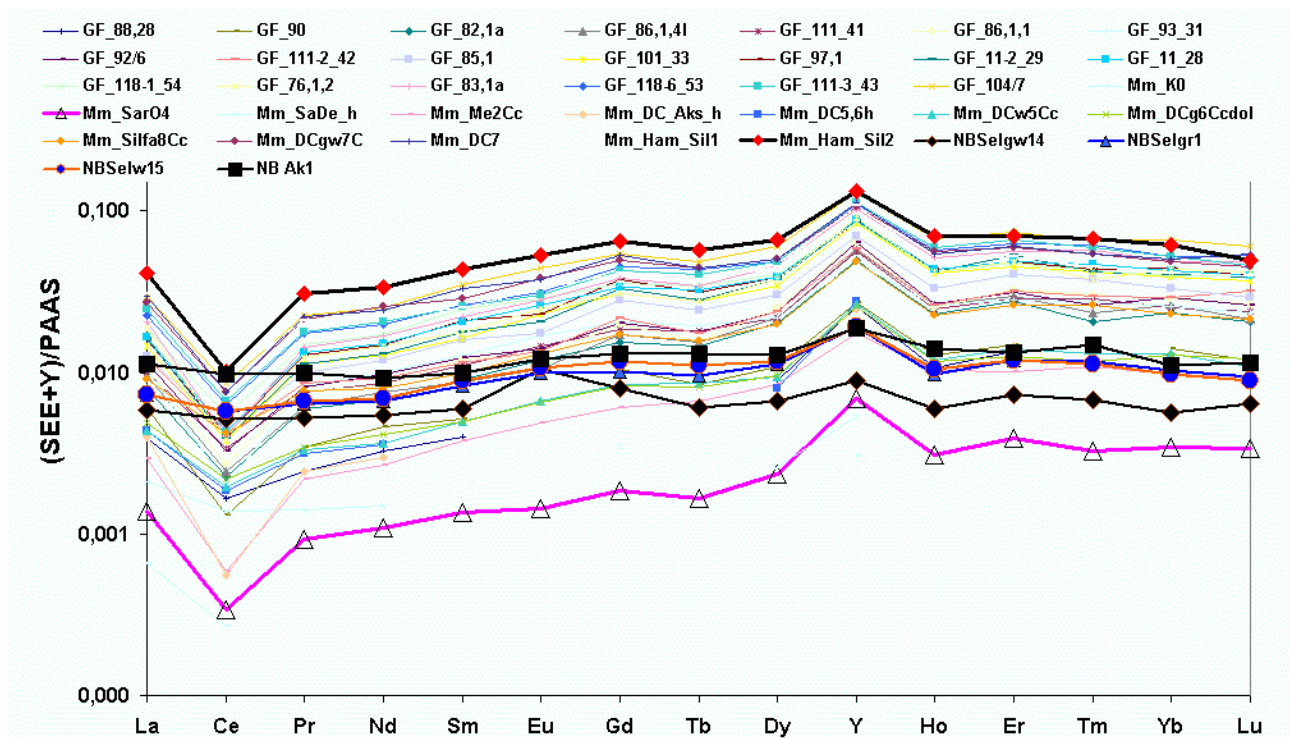


Abbildung 105: Bei relativ ähnlichen Gesamtgehalten weisen die PAAS-normierten SEE der Marmore von Akkaya (NB, nördlich von Bergama im Kozak) einen fast horizontalen Kurvenverlauf auf, die prokonnesischen Marmore des Großen Frieses (GF) und andere Marmara-Proben hingegen große Schwankungen der SEE-Gehalte, eine ausgeprägte negative Cer-Anomalie sowie $\Sigma SEE/Y$ -Verhältnisse von 1 gegenüber 2,5-4,3 bei den Akkaya-Marmoren

Die SEE-Gehalte schwanken – auch innerhalb einer Marmoreinheit – beträchtlich in der Summe zwischen 0,1 und 7,6 ppm, weisen aber zumeist ähnliche Verteilungsmuster mit einer

ausgeprägten negativen Cer-Anomalie auf, die eine deutliche Unterscheidung der prokonnesischen Marmore des Pergamonaltars z.B. von denen der Akkayabrüche im Kozak nördlich

von Pergamon (Abbildung 105) oder von Euromos (s. Abbildung 39) erlauben. Ebenso sind molare Y/Ho-Verhältnisse zwischen 80 und 130 sowie ein Verhältnis der Summe der SEE zu Y zwischen 0,8 und 1,4 (s. a. Vergleich mit Euromos in Abbildung 167) Indikatoren für ein relativ reines marines Kalksteinedukt ohne nennenswerten terrestrischen Eintrag. Dies gilt insbesondere für die Proben der Lokalitäten Köyüste Denizli bei Saraylar, Doğu Camlik und Silinte – und sämtliche Proben des Pergamonaltars, des Geisons des Markttempels und des Demeterfrieses von Pergamon. Von diesem – sich auch in den EPR-Spektren und der Kathodolumineszenzmikrofazies (s. dort) ausdrückenden – einheitlichen Bild weichen die Proben von Mandira, Aksoy sowie Salta Tepesi ab; die von Köyüste Altıntaş und dem küstennahen Mermercik zeigen widersprüchliche Ergebnisse. Die akzessorienreichere Marmore der Hafentherme von Ephesos weisen die beste Übereinstimmung mit Mandira-Marmor-Proben auf.

Isotopische Merkmale

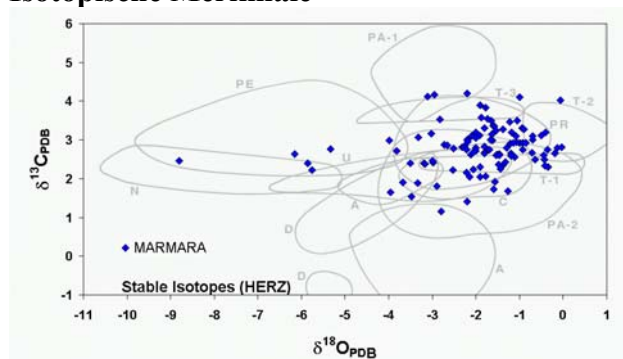


Abbildung 106: Aus Originaldaten von HERZ (2003, persönl. Mittel.) erstelltes Isotopendiagramm prokonnesischer Marmore

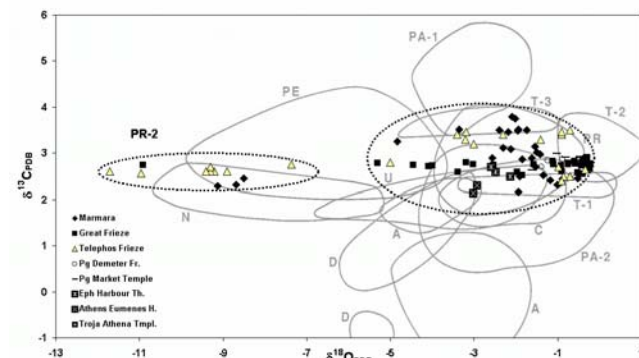


Abbildung 107: Isotopendiagramm prokonnesischer Marmore aus eigenen Daten (Marmara und Museumsproben) mit den Feldern PR-1 und PR-2

Bis vor kurzen wurde in der Literatur für prokonnesische Marmore ein recht eng begrenztes

Isotopenfeld PR angegeben (Abbildung 106 und Abbildung 107), in das auch die meisten unserer als prokonnesisch identifizierten Proben fallen (vgl. Überblick in Kapitel 7.2). Einige Proben von der küstenferneren Marmarasteinbruchlokalität Doğu Camlik⁵³ stimmen jedoch auch isotopengeochemisch sehr weitgehend mit denen der Telephos-Fries-Platten 1-8 sowie mindestens einer Friesplatte (Nr. 93) des Großen Altars überein (Abbildung 107).

Unterdessen gilt die Existenz eines zweiten Isotopenfeldes PR-2 als gesichert (bes. GORGONI & PALLANTE 2000; GORGONI *et al.* 2002). Angesichts der Bedeutung prokonnesischer Marmore und der Gefahr von Fehldeutungen sollte diese Erkenntnis eine weitere Verbreitung in der vor allem auf Isotopendaten fixierten archäometrischen Forschergemeinde finden. Ob, wie in Abbildung 107 angedeutet, in Zukunft beide Felder zu einem fusionieren, bleibt abzuwarten.

Abbildung 106 lässt vermuten, dass bei der Erstellung des wesentlich auf die Messdaten von Norman Herz zurückgehenden Prokonnesos-Isotopenfeldes die wenigen negativeren δO -Werte nicht als Hinweis auf die Existenz des PR-2-Feldes, sondern als statistische Ausreißer gewertet und eliminiert wurden⁵⁴. Das Fehlen dieses Feldes hatte anfänglich die prokonnesische Zuordnung der Telephosfries-Marmore erschwert, in denen beide Isotopiefelder in fast gleicher Anzahl vertreten waren.

Die Deutung dieser negativeren δO -Werte als Verwitterungseffekte ist eine höchst unbefriedigende Erklärung. Eher dürfte dieses Phänomen auf geogene Faktoren zurückzuführen sein, die in den einheitlich wirkenden Marmorbanken leicht übersehen werden können:

⁵³ Die Isotopie einer Probe von Doğu Camlik mit δO -12,96 wurde nicht in die Datenbank aufgenommen, da ihr niedriger δC -Wert von 0,61 auf eine lösungsbedingte Verarmung hindeutet; ansonsten besitzt sie alle Marmarotypischen Merkmale, wengleich der Dolomitgehalt höher ist (Dol: 4%, Mg: 1,1%).

⁵⁴ Allerdings ist unbekannt, wann in die von Norman Herz kürzlich zur Verfügung gestellte Originaldatenbank diese negativeren Isotopenwerte aufgenommen wurden.

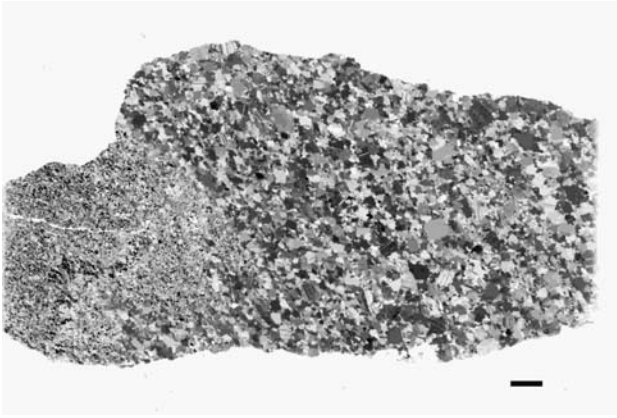


Abbildung 108: Kontaktbereich Granatamphibolitglimmerschiefer (links) / Marmor (rechts) in Dünnschliff (SilfaP1), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Neben konkordanten Granatamphibolitschiefer-Lagen (Abbildung 108) lassen sich jüngere Lamprophyrgänge auffinden, die die Marmorhorizonte diskordant durchschlagen (Abbildung 109). Wahrscheinlich sind die Variationen der Marmorgeochemie und Isotopie durch mit diesen magmatischen Aktivitäten in Zusammenhang stehende Fluide beeinflusst worden – ein Phänomen, das u.a. von Naxos bekannt ist, wo die Sauerstoffisotopie noch wesentlich stärker variiert (siehe Abbildung 48 auf S. 79).

Die Analyse der in den Schiefen und Ganggesteinen enthaltenen oder unmittelbar angrenzenden Karbonatphasen einschließlich Verkärsungen zeigt folgende Isotopenvariationen und von den unbeeinflussten Marmoren stark abweichende Spurenelementgehalte (Tabelle 24):



Abbildung 109: Diskordanter Lamprophyrgang in Marmara-Marmor bei Mandira

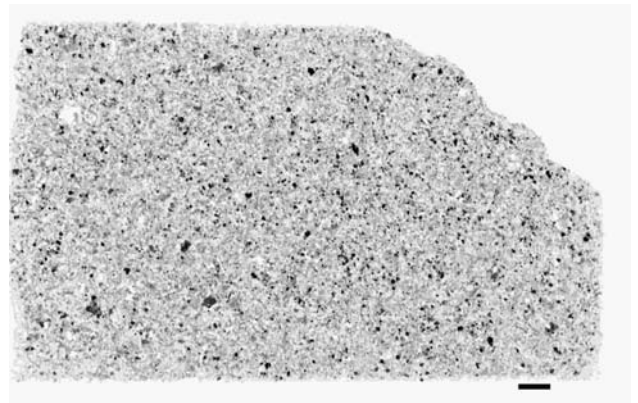


Abbildung 110: Dünnschliff von obigem Lamprophyr (Man3Lamp), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Karbonat in:	δO	δC	Mn ppm	Sr ppm	Fe ppm	Mg Gew%	ΣSEE	$\Sigma SEE/Y$	Y/Ho	Cer _{neg}
Marmara "typisch"	-0,5 / -4,8	1,1 – 3,5	2,5-10	125-226	10-41	0,3-0,4	0,6-4,1	0,7-1,2	92-136	0,2-0,5
Marmor DoğuCamlik	-8,7 / -13	2,3	5,4	132	25	0,25	0,7	0,98	113	0,5
Lamprophyr Mandira	-12,4	-2,7	95	16	11300		5	1,8	47	0,9
	-11,8	-2,7								
Schiefer Silinte	-11,6	-2,7								
	-12,7	-3,0	510	43	25400		4,5	2	49	0,9
	-9,0	-2,1								
	-7,1	2,4	865	15	19830		7,7	4,5	53	1,3
	-6,5	2,4								
Karst	-9,6	-2,1	495	3	6820		54	10	48	1,3
	-8,4	-1,9								
MmMerm2 karst	-8,2	-11,3	0,5	14	154	0,03	4,7	3,9	99	0,1
	-7,8	-11,1								
MmMerm2 karst	-8,7	-10,2	3,5	23	110	0,02	0,65	1,9	96	0,7
Mm Merm	-1,8	2,9	2,5	136-258	17-20	0,5	0,14-0,4	0,9-1,6	86-97	0,2-0,6

Tabelle 24: Geochemische Kennwerte karbonatischer Phasen in verschiedenen Gesteinstypen von Marmara

Die stärkste Verarmung schwerer Sauerstoffisotope tritt gleichermaßen infolge magmatischer und metamorpher (Schiefer-) Bildungsprozesse auf. **Verkarstung** von Marmoren wird zusätzlich von einer beträchtlichen Verarmung der schweren Kohlenstoffisotopen (δC bis -11) begleitet, die bei den hier untersuchten Proben stärker ausgeprägt ist als bei den anderen durch fluide Phasen hervorgerufenen Alterationsprozessen (vgl. Kalksteine in Abbildung 14 und Isotopenvariationene in Abbildung 48 auf S. 79). Zusätzlich geht aus Tabelle 24 und Abbildung 113 hervor, dass bei **Verkarstungen** an Marmoren der gleichen Lokalität (hier Mermercik) das SEE-Muster wie auch die Mn-Gehalte der Marmore weitgehend erhalten bleiben können, Fe weist eine deutliche Anreicherung auf, Sr sowie Mg eine starke Verarmung.

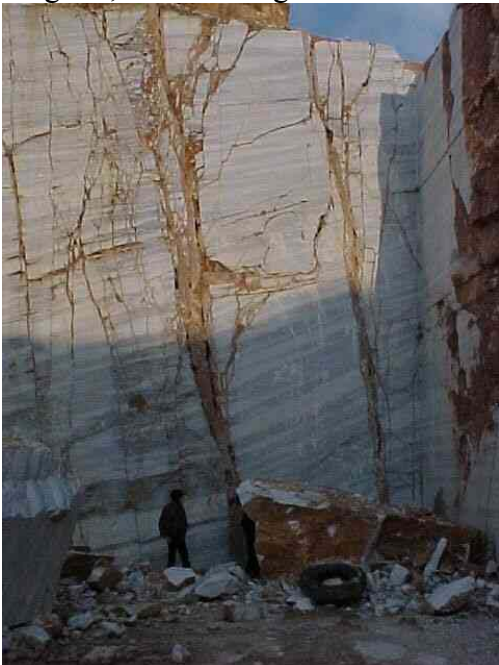


Abbildung 111: Einfluss von Klüften und Verkarstung auf abbaubare Blockgrößen, Silinte, Marmara.



Abbildung 112: Moderner Marmorabbau in Dincer-Steinbruch im W-Teil von Marmara. Man beachte die Begrenzung der Abbaumöglichkeiten durch Auswirkungen der Karstbildung

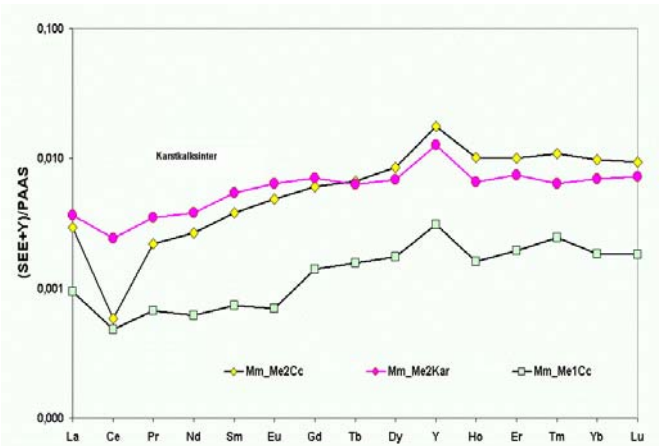


Abbildung 113: SEE in Marmor und angrenzendem Karstkalksinter; lediglich Cer ist signifikant verändert

Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Um die oben getroffenen Aussagen zu überprüfen und auch statistisch abzusichern, wären weitere Geländebeprobungen und Messungen notwendig. Sollten die Vermutungen zu den genaueren Abbauorten (insbesondere Doğu Camlik und Mandira) der in Pergamon verwendeten Marmore zutreffen, wäre bemerkenswert, dass sie nicht in unmittelbarer Küstennähe lagen, obwohl auch dort gute Marmorqualitäten vorkommen. In der römischen und byzantinischen Zeit fand dieser küstenferne Abbau tatsächlich statt, wie die zahlreichen liegengebliebenen Artefakte dokumentieren. Das Fehlen ähnlicher Zeugen früher hellenistischer Abbautätigkeit lässt vermuten, dass deren Nachfolger an den gleichen Orten die Abbautätigkeit fortsetzten und im Laufe der Jahrhunderte von den anfänglichen Abbauspuren nichts mehr übrig ließen.

Archäologisch und kunsthistorisch aufschlussreich ist die Erkenntnis, dass prokonnesischer Marmor in hellenistischer Zeit – so beim Pergamon-Altar – offensichtlich vorwiegend parallel zur Bänderung bearbeitet wurde, entweder um einen homogenen weißen Farbeindruck zu erwecken oder weil er übermalt wurde, wohingegen seit römischer und byzantinischer Zeit verstärkt dekorative Effekte zur Geltung gebracht wurden, die sich durch senkrechte oder schräge Anschnitte zur auffälligen Bänderung ergeben. Wohl deshalb wurden prokonnesische Marmore oft auch als Buntmarmore beschrieben (s. Abbildung 21 aus MIELSCH (1985)).

In Tabelle 25 sind wesentliche Eigenschaften der Marmara-Marmorproben und der prokonnesischen Proben des Pergamonaltars zusammenfassend dargestellt.

	Marmara	Pergamonaltar
Petrographische Merkmale:		
Farbe	(grau-)weiß,	(grau-)weiß,
Schichtung, Bänderung	parallele graue Bänder	graue Bänder meist parallel zur Skulpturenoberfläche
Korngrößenverteilung Max. Korngröße (MGS)	bimodal bis lognormal 2 – 3,5 mm	bimodal bis lognormal 2,3 – 3,6 mm
Zwillingslamellen im Calcit	zahlreich, z.T. gebogen	zahlreich, z.T. gebogen
Korngrenzen	verzahnt, unregelmäßig	verzahnt, unregelmäßig
Mineralphasen	98 Gew% Calcit; Akz.: Quarz, Glimmer, Pyrit, Fe-Oxide	98 Gew% Calcit; Akz.: Quarz, Glimmer, Pyrit, Fe-Oxide
Dolomit	0-4 Gew%	0-1,6 Gew%
Geruch bei mechanischer Zerstörung (Kratzen, Mahlen)	stark nach H ₂ S – faulen Eiern	stark nach H ₂ S – faulen Eiern
Chemische Zusammensetzung:		
Mg (ICP-OES) Gew%	0,21 – 1,1	0,2 – 0,69
Sr (ICP-MS + ICP-OES) ppm	113 – 275	141 – 266
Fe (ICP-OES) ppm	8 – 91	10 – 80
Mn (ICP-OES) ppm	2,5 – 10,1	4,2 – 10,6
Σ SEE (ICP-MS) ppm	0,05 – 5,2	0,6 – 6,1
Σ SEE/Y	0,32 – 1,46	0,7 – 1,4
Neg. Cer-Anomalie	0,2 – 0,5	0,1 – 0,5
Y/Ho (niedr. Werte Bänder.)	86 – 150	80-136
Kathodolumineszenz (Ramseyer und Decrouez)	blau bis schwach orange (s. Kapitel 4.11)	schwach orange
O/C-Isotopie:		
δ ¹⁸ O	-8,5 – -9,13 / -0,5 – -4,8	-7,4 – -11,7 / -0,2 – -5,3
δ ¹³ C	1,1 – 3,5	2,4 – 3,5
Andere Argumente:		
Verfügbarkeit von Marmor	Sehr große Marmorlagerstätte	Nur kleine lokale Marmorlinsen
Logistische Situation	Schiffstransport zum Verwendungsort möglich	Ausschließlich landgebundener Transport für anatolische Quellen

Tabelle 25: Merkmale prokonnesischer Marmore von Marmara und am Pergamonaltar (nach GERMANN & CRAMER in press)

6.2 Thasos

Thasos (siehe Karte Abbildung 16) gehört zu den Lagerstättenbezirken, die bereits seit dem 6. Jh. v.u.Z. eine zentrale Bedeutung für die Marmorversorgung der antiken Welt in hellenistischer über römische bis in byzantinische Zeit gewonnen haben.



Abbildung 114: Überreste des antiken Marmorabbaus von Thasos-Aliki



Abbildung 115: Trennwand aus Marmor zur Abgrenzung von Brüchen in Aliki



Abbildung 116: Liegende Säule im Bruch von Thasos-Aliki



Abbildung 117: Moderner Dolomitmarmorsteinbruch (Cape-Vathy-Typ) südlich von Limenas in N-Thasos



Abbildung 118: Überreste der Verhüttungsanlage von Limanes in Südthasos



Abbildung 119: Übergangszone Marmor/Schiefer bei Chriasiatou, Thasos

Auf Thasos konnte im September 2003 zusätzliches Probenmaterial, bisher nur für Dünnschliffaufnahmen, entnommen werden. Von der an der Südküste gelegenen Halbinsel Aliki ist über die Jahrhunderte soviel ihres grobkörnigen und homogenen Calcitmarmors abgebaut worden, dass unterdessen mehrere hundert Meter Schrotgräben und sonstiger Abbauspuren ins Meer reichen (Abbildung 114-Abbildung 116). Viele wegen Mängeln liegengebliebene Kapitell-, Säulen- und Sarkophag-Rohlinge dokumentieren die antike Nutzung eindrucksvoll.

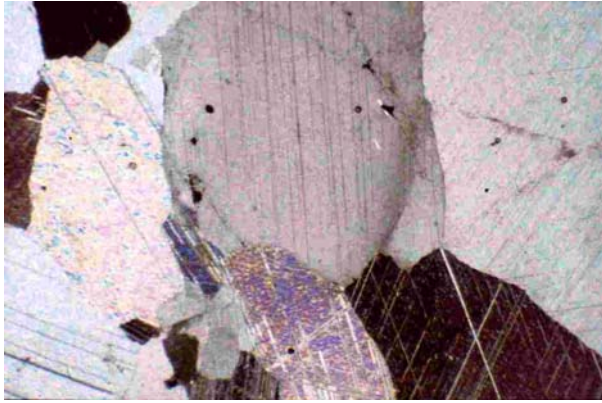


Abbildung 120: DS von Thasos-Aliki-Marmor, ARM30. Kurze Kante = 2,4 mm

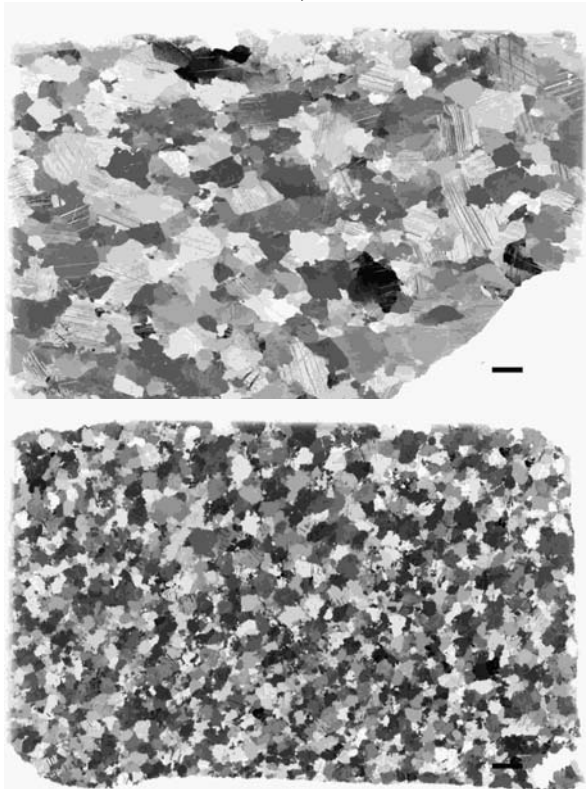


Abbildung 121: Grobkörniger Marmor von Thasos-Aliki (o., ThaAl3) und fein-mittelkörniger dolomitischer Marmor vom Cape-Varthy-Typ (u., ThaD3), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Während die Marmore von Thasos-Aliki noch wesentlich größere Korndurchmesser aufweisen können als in Abbildung 121 oben erkennbar, sind die dolomitischen Marmore von Thasos feinkörniger, im Vergleich zu anderen dolomitischen Marmoren jedoch ungewöhnlich grobkörnig. Sie gehören zu dem südlich von Thasos-Limenas durch eine Glimmerschieferformation (Abbildung 119) abgetrennten Gürtel hellweißer fein- bis mittelkörniger Dolomitmarmore, die noch heute in großen Steinbrucharanlagen (Abbildung 117) Abbildung 118 als „Snow White from

Thasos“ abgebaut und als fast einziger Marmor vermarktet werden. Südlich einer modernen marinen Marmor-Verladestation befindet sich in einer abgeschiedenen Bucht die antike Lokalität Cape Varthy mit Abbau Spuren und antiken Fragmenten. Namhafte Autoren (HERRMANN JR. & NEWMAN 1995; WURCH-KOZELJ & KOZELJ 1995) nehmen an, dass die meisten in der Antike aus weißem Dolomitmarmor hergestellten antiken Skulpturen hier ihren Ursprung haben. Leider konnten von diesen Marmoren bisher lediglich Dünnschliffe angefertigt werden.

Anders verhält es sich mit den Thasos-Aliki-Marmoren (BESTMANN 2000). Ihre petrographischen, geochemischen und isotope geochemischen Eigenschaften werden detaillierter bei der Untersuchung des Tempels R von Pergamon (Kapitel 7.7.15) und des Dodekastylos im Apollontempel von Didyma (Kapitel 7.5.4) besprochen. Häufig sind relativ gerade Korngrenzen und feine opake Einschlüsse in dem deutlich homogenerem Gefüge als bei den prokonnesischen Marmoren erkennbar (Abbildung 120).

Bemerkenswerterweise zeigen alle 5 Thasos-Aliki-Proben ein ähnliches SEE-Verteilungsmuster (Abbildung 348 S. 235), wohingegen die dolomitische (Mg 10 Gew%) Prinos-Probe weniger Cer aufweist. Die Mn-Gehalte schwanken zwischen 12 und 80, die Fe-Gehalte zwischen 70 und 170 ppm. Die relativ geringen Fe-Gehalte dürften neben dem recht grobkörnigem homogenem Korngefüge der dolomitischen Marmore ursächlich für deren hellweiße Farbe und damit ihren hohen damaligen wie heutigen „Marktwert“ sein.

Der gewaltige Umfang modernen Marmorabbaus macht sich nicht nur in den mächtigen Steinbrucharanlagen bemerkbar, die sich weit sichtbar in das Gebirge schneiden, sondern auch an der Nutzung des Abfallmaterials als große Blöcke zur Uferbefestigung, für Straßen- und Wegschotter oder einfach als wilde Müllhalden, die besonders entlang der ehemaligen küstenparallelen Verbindungsstrasse zwischen Chrissi Amoudia und Limenas hangabwärts verkippt werden. Andere moderne Spuren des seit der Antike betriebenen Abbaus von Erzen sind demgegenüber äußerst erhaltenswert (Abbildung 118).

6.3 Lesbos (Moria)



Abbildung 122: Blick auf erstarrte Lavafront nördlich von Thermi

Geologisch und morphologisch prägnant sind auf Lesbos (siehe Karte Abbildung 16) vor allem die über die Hälfte des Inselareals bedeckenden vulkanischen Gesteine (Abbildung 122). Sie entstanden vor 22-18 Millionen Jahren (HIGGINS & HIGGINS 1996) im Zusammenhang mit der seit dem Oligozän einsetzenden Spannungstektonik und dem hieraus resultierenden intensiven kalkalkalinen Vulkanismus im gesamten Mittelmeerraum (vgl. Diskussion der Andesite in Kapitel 7.7.2). Spektakulärer Zeuge dieser vor 18 Millionen Jahren mit ignimbrischen Eruptionen verbunden vulkanischen Aktivitäten ist der „Versteinerte Wald“ bei Sigri im Westen der Insel. Auch wenn der Vulkanismus schon lange erloschen ist, belegen zahlreiche heiße Quellen (87°C bei Polychnitos) die fortgesetzten Auswirkungen der Kollisionsbewegungen zwischen afrikanischer und eurasischer Platte.

Aber im Südosten brachte die Insel auch den in römischer Zeit begehrten dunklen Marmor *Bigio Antico* hervor, der im Edikt des Diokletian mit 40 Dinar in der Größenordnung ebenfalls preiswerter prokonnesischer und thasischer Marmore bewertet wurde.

Die geographische Nähe von Lesbos zu Pergamon ließ es von Anfang an notwendig erscheinen, dortige Marmorlagerstätten als Lieferanten in Betracht zu ziehen.

Bereits die Arbeiten von HECHT (1972) und LAZZARINI *et al.* (1999) hatten Hinweise dafür geliefert, dass zumindest einige der mit hellen Fossilresten versehenen dunklen Marmore in Pergamon von hier stammten. HECHT (1972) beschreibt folgende Marmore: unterkarbonische und permische Marmorho-

rizonte zwischen 50 m (mit heller bis graublauer Farbe) und 100 m Mächtigkeit, die permischen Marmore auch darüber, mehrere Dekameter mächtige Marmorbrekzien, die Korngrößen variieren zwischen grobkristallin bis äußerst feinkörnig, "eigenartigerweise sowohl in den schwächer als auch in den stärker metamorphen Bereichen".

Leider ergab sich erst im Anschluss an die 7. ASMOSIA-Konferenz auf Thasos im September 2003 die Möglichkeit, kurz die Marmorvorkommen von Lesbos Moria aufzusuchen und bis nach Thermi einiges Probenmaterial zu entnehmen, von dem anschließend bisher lediglich Dünnschliffe angefertigt werden konnten.

Der Besuch der Burg (Kastro) und der beiden vorzüglichen Museen von Mytilene sowie der antiken Steinbrüche von Moria machten deutlich, dass zwischen Lesbos und dem hellenistischen Pergamon eine stärkere Beziehung bestanden haben dürfte als bisher angenommen. Hauptbaumaterial im antiken Mytilene ist vulkanisches Gestein (roter und grüner Andesit, Tuff, Trachyt, harter schwarzer Basalt), an dem auf der Insel kein Mangel besteht.

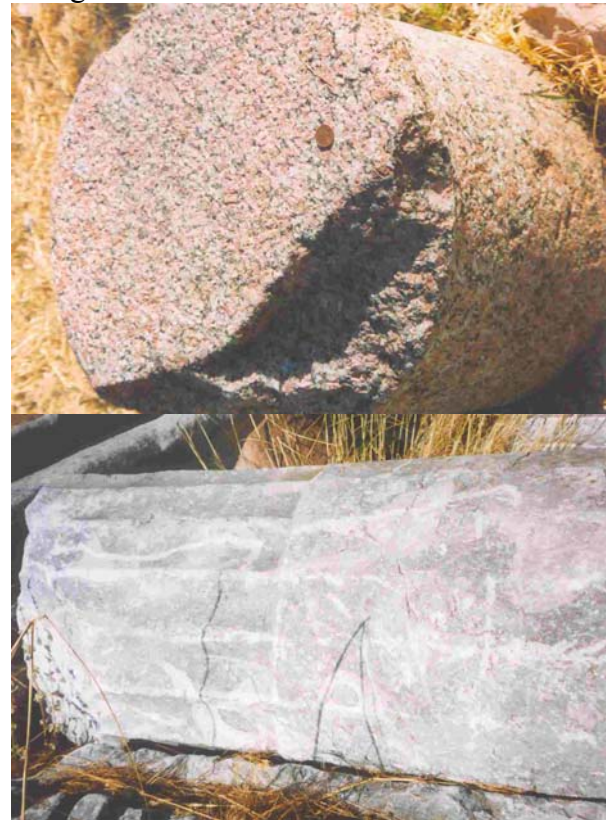


Abbildung 123: Granitsäule mit roten Feldspatkrystallen und graue Marmorsäule mit hellen Fossilresten auf dem Kastro von Mytilene/Lesbos

Daneben liegen auf dem Kastro-Gelände und selbst am Strand vor der Abzweigung nach Moria antike Säulen aus dunklem Kozak-Granodiorit (s. Abbildung 306 S. 215) sowie rotem Granit mit großen Feldspatkristallen (Abbildung 123). Entsprechende Plutonite sind auf Lesbos nicht ausgewiesen. Fein- bis mittelkörniger weißer Marmor fand untergeordnet Verwendung. Bei Geländebegehungen im Bereich von Moria und unterhalb des Klosters Agios Rafail fanden sich beide Varianten als Feldsteine zur Terrassierung für den großflächigen Olivenanbau und im Geröll der Bäche, in denen jedoch Schiefer bei weitem dominieren.

Wesentlich häufiger vertreten ist ein hell- bis dunkelgrauer, gelegentlich fast schwarzer Marmor, oft mit weißlichen Mustern, die eine Folge sekundären Wachstums von Calcitkristallen an Unstetigkeitsstellen sein könnten. Besonders eindrucksvoll werden sie an Schalenüberresten fossiler Megalodonten deutlich, die häufig, aber keineswegs immer, vorkommen. Sie finden sich in den Steinbrüchen von Moria (Abbildung 124-Abbildung 130), in denen die fossilen Reste – oft senkrecht zur Schichtung eingeregelt (Abbildung 128) – massiv auftreten.

Diese Steinbrüche sind mehrere hundert Meter lang, bis 50 m hoch und in mindestens zwei hintereinanderliegende Abbaugalerien gestaffelt (Abbildung 125). Das Abbauvolumen dieses in der Römerzeit begehrten schwarzgrauen musterreichen *marmor lesbi-um* oder *Bigio Antico* war gewaltig. Der größte Bruch ist 200 m lang, 120 m breit und bis 30 m tief (LAZZARINI *et al.* 1999). Neben großen kompakten Vorräten und dem auffälligen Design war die Küstennähe (s. Abbildung 124) sicherlich ausschlaggebend für ihren niedrigen Preis und ihre weite Verbreitung von Rom bis Byzanz. Über das gesamte Bruchgebiet und darüber hinaus verstreut befinden sich dutzende von liegengeliebenen Kapitellen und Säulen (Abbildung 124, Abbildung 129 und Abbildung 130), die größte von mir vermessene ist bei 0,88 m Durchmesser 3,52 m lang. Keineswegs alle weisen erkennbare Schädigungen auf.



Abbildung 124: Blick von Moria-Brüchen auf die Ostküste von Lesbos. Vorne rechts antike Säule



Abbildung 125: Zweite der gestaffelten Lesbos-Moria-Abbaugalerien



Abbildung 126: Grubenbau der Lesbos-Moria-Marmore



Abbildung 127: Manuell erzeugte Schrämspuren an Lesbos-Moria-Abbauwand



Abbildung 128: Subparallel zur Schichtung verlaufende Fossilreste in Lesbos-Moria-Steinbruch



Abbildung 129: Grauer Marmor mit charakteristischen Megalodonten-Schalen, Lesbos Moria



Abbildung 130: Graugesprenkelte Säule aus dem gleichen Bruch ohne markante Fossilien

Die erkennbaren Korngrößen der calcitischen Marmore reichen von fein- bis mittelkörnig mit maximalen Korndurchmessern von 3-8 mm bei einem Median von 4 mm (LAZZARINI *et al.* 1999). Bei den Fossilien soll es sich neben *Megalodon sp.*, die die in Abbildung 128 und Abbildung 131) erkennbare orientierte Deformation aufweisen, um Crinoidea und Biomikrite handeln. Trotz der dunklen Färbung trat beim Anschlagen kaum ein Geruch auf.



Abbildung 131: Dünnschliffe von Moria-Marmoren mit wenigen (o. LbMo3) und vielen (u. LbMo4) Fossilresten, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Die triassischen Marmore mit Megalodontenführung im oberen Teil sollen in anchiabis epithermale Phyllite, Sandsteine und Quarzkonglomerate eingelagert sein (JACOBSHAGEN 1986, S. 174), die sich in der Tat zusammen mit Quarziten fanden. Das schon von HECHT (1972) bei Lesbos-Marmoren registrierte auffällig weite Korngrößenspektrum, die verwaschenen und sehr unregelmäßigen, gezahnten Korngrenzen, ausgeprägte Kornlängung, der Erhalt eines großen Teils des Fossilbestands und zugleich ausgeprägte Deformationserscheinungen (u.a. gebogene Zwillingslamellen, undulie-

rende Auslöschung) deuten auf schwache grünschieferfazielle Bildungsbedingungen

mit höhergradigen Metamorphosepeaks und postkristalliner Deformation hin.



Abbildung 132: Moria-Marmore im pergamenischen Rundmonument des Attalos I bei Athenatempel

Marmorobjekte des Moria-Typs finden sich nicht nur auf dem Kastro und im Museum von Mytilene (datiert seit dem frühen 4. Jh. v.u.Z.), sondern auch in Pergamon, und zwar in beträchtlichen Mengen (s. Diskussion ab Kapitel 7.7.6). Zu den ältesten datierbaren Stücken gehören solche mit charakteristischen Megalodonten (Abbildung 132), u.a. in den Stufen zum Großen Altar eingebaut, aber auch graue mittelkörnige Marmore mit und ohne Muster.

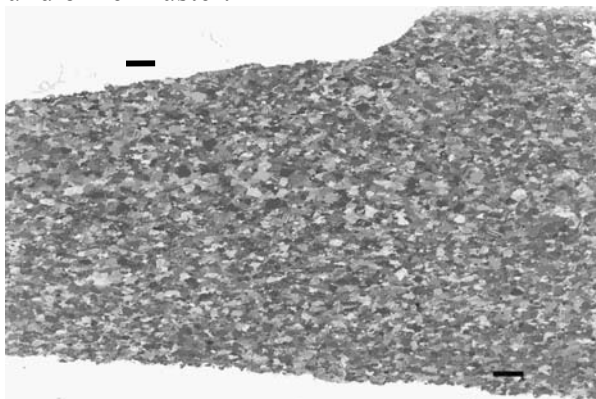


Abbildung 133: SW-Dünnschliffaufnahme von grauem Marmor im Sockel des Zeusaltars (Kaegr_1), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Die Probe (Kaegr_1) eines ungemusterten, aber geschichteten, körnig-glänzenden grauen Marmors vom Sockel des Telephosfrieses, wie sie sich auch an der Außenwand des Altarhofs und seiner Rückseite befinden (Kapitel 7.7.6), fällt mit δC von 0,7 und δO

von -3,2 in das von Lazzarini beschriebene Isotopenfeld der Moria-Marmore (δC 0,7 / 2,7; δO -0,2 / -4,2, vgl. Abbildung 338). Sie ist feinkörniger (Abbildung 133) und wesentlich akzessorienreicher (viele Quarz- und opake Lagen sowie Glimmer) als von Lazzarini für die Moria-Marmore (MGS 3 – 8 mm) beschrieben, ähnelt aber äußerlich stark auch dort auffindbaren Marmoren, die leider nicht beprobt wurden.

Demgegenüber zeigen die eigenen Moria-Dünnschliffe durchaus erhöhte Anteile an Quarz, Glimmern und kohligen Flittern, die das Graphitstadium nicht erreicht haben.

Ebenfalls sehr akzessorienreich sind die uneinheitlich grauweißen Proben des Waffenreliefs der pergamenischen Athenahallen (Kapitel 7.7.12). Trotz fehlender Fossilspuren lassen ihre Isotopie und Gefügemerkmale ebenfalls eine Herkunft aus den Moria-Brüchen vermuten.



Abbildung 134: Thron des Potamon im Museum von Mytilene von vorne und von der Seite. Er besteht aus einem Marmor mit dem erkennbaren heteroblastischem Korngefüge und der charakteristischen parallelen Bänderung prokonnesischer Marmore. Fotos aus Museumsführer (ARCHONTIDOU & ACHEILARA 1999, S. 96)

Im Museum von Mytilene sind aber auch deutliche Hinweise auf die – zeitgleich zu Pergamon – frühe Verwendung prokonnesischer Marmore zu finden. So weist der aus der Mitte des 3. Jh. v.u.Z. stammende Thron des Potamon deren charakteristische Bänderung, Farbton und heteroblastisches Korngefüge (geschätzte MGS 3 mm) auf. Nähere Untersuchungen im Museum waren nicht möglich (Abbildung 134).

Im 8. und 7. Jh. v.u.Z. übte Mytilene die Kontrolle über einen Saum der benachbarten kleinasiatischen Küste aus, und vom 4. Jh. v.u.Z. bis zum 1. Jh. u.Z. wurde wie auch in Pergamon dem in Kleinasien beheimateten Demeter-Kult gehuldigt, ebenso hat der Telephos-Mythos deutliche Spuren hinterlassen. Ansonsten scheinen sich beide Herrschaftsgebiete nicht näher berührt zu haben; die kleinasiatischen Landbesitzungen umfaßten nur einen schmalen Küstenstreifen. Nach der Schlacht am Ipsus (301 v.u.Z.) stand es zunächst unter der Kontrolle von Lysimachos, seit 280 v.u.Z. unter der der Ptolomäer. Seit dem 2. Jh. v.u.Z. kam, wie auch in Pergamon, der römische Einfluß verstärkt zur Geltung. Trotz dieser Überschneidungen findet sich weder im Mytilene-Museumsführer ein Hinweis auf Pergamon, noch wird umgekehrt z.B. bei RADT (1999) Mytilene auch nur erwähnt.



Abbildung 135: Römischer Aquädukt bei Moria aus grauem Marmor, Ziegeln und Glimmerschiefern

Die Bedeutung Mytilenes im allgemeinen und der Moria-Brüche im besonderen während der römischen Epoche wird auch an den Überresten des römischen Aquädukts am den Brüchen gegenüberliegendem Ortsausgang von Moria deutlich (Abbildung 135). Es besteht ebenfalls aus dunklem Marmor, die Bögen der obersten Stufe sind allerdings aus Ziegeln hergestellt, und die Zwischenräume offensichtlich mit Feldsteinen aus lokalen Glimmerschiefern ausgefüllt.

Kann die Verwendung dunkler Marmore aus den Moria-Brüchen in Pergamon durch die bisherigen Beobachtungen und Analysen als abgesichert gelten, so läßt sich die Verwendung weißer Marmorvarianten in Pergamon, die ebenfalls auf Lesbos (einschließlich bei zahlreichen Museumsobjekten) vorkommen, keineswegs ausschließen. So sollen bei Thermi qualitativere Marmore abgebaut worden sein, die auch heute noch ausgebeutet werden (HIGGINS & HIGGINS 1996). Aus all diesen Gründen sollte der Aufforderung der Direktorin des K'Ephorates von Mytilene, Frau Archontidou-Argyri, nachgekommen werden, für die Klärung dieser archäologisch keineswegs irrelevanten Fragen über das DAI ein Forschungsprojekt zu beantragen, ohne dessen ministerielle Genehmigung selbst Publikationen auf Schwierigkeiten stoßen würden.

6.4 Mäandertalregion: Geomorphologie, Geologie, Lagerstätten, Eigenschaften und Verwendung von Marmor und anderen Werksteinen

6.4.1 Geomorphologische Entwicklung

Gerade unter dem Gesichtspunkt der Transportmöglichkeiten antiker Marmore von den Lagerstätten bis zu den Zielorten muss berücksichtigt werden, dass sich das geomorphologische Bild der Landschaften des westlichen Kleinasien in den letzten drei Jahrtausenden stark verändert hat. Viele der an der Küste angelegten antiken Stätten verloren durch Verlandung ihre Meeresanbindung, und oft war im Verlauf ihrer Geschichte eine mehrfache Neugründung zumindest der Hafenanlagen erforderlich (vgl. Abbildung 138). Dies galt beispielsweise für Troja, das am Küçük Menderes gelegene Ephesos und ganz besonders für die Städte am Unterlauf des Büyük Menderes. Seit 1990 werden in interdisziplinären Forschungsprojekten (u.a. Archäologie, Geologie, Geomorphologie, Geophysik) auch diese Fragen genauer untersucht. Auf eine detaillierte Darstellung muss hier verzichtet werden; die Ergebnisse können aber auf der ausgezeichneten Homepage des Projektes (<http://www.ruhr-uni-bochum.de/milet>) verfolgt werden.

Der nacheiszeitliche Anstieg des Meeresspiegels um fast 125 m kam vor etwa 5500 Jahren zum Abschluss (BRÜCKNER 1999). Infolgedessen wurden die durch tektonische Bruchlinien vorgegebenen Täler der Gebirgsmassive an der türkischen Küste mit Meerwasser aufgefüllt; im Mäandergraben entstand so der Latmische Golf (Abbildung 136), der bis zum heutigen Aydin 60 km landeinwärts reichte (BAY 2002).

Im weiteren Verlauf wurde die natürliche Erosion der Gebirge infolge intensiver Abholzung beschleunigt, was zu einer Erhöhung der Sedimentationsfracht und folgender Verlandung der Flussdeltas führte.

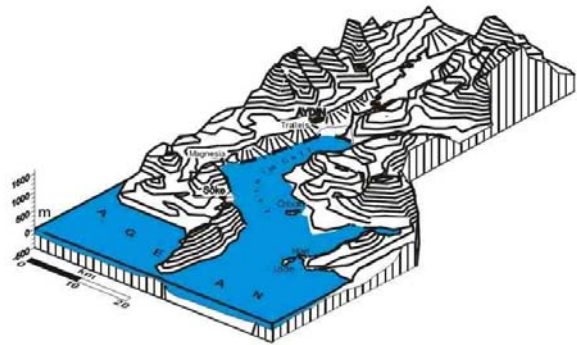


Abbildung 136: 3-D Darstellung des Latmischen Golfes vor ca. 4000 Jahren (BAY 2002)

Beispielsweise verlandete von 600 bis 250 v.u.Z. der Abschnitt C des Büyük Menderes (Abbildung 137). Der heutige Bafa-See ist ein abgeschnittener Arm des damaligen Latmischen Golfes und besaß in archaischer und hellenistischer Zeit - genauso wie die Häfen von Didyma, Myus, Priene und Milet - direkten Zugang zum Meer.

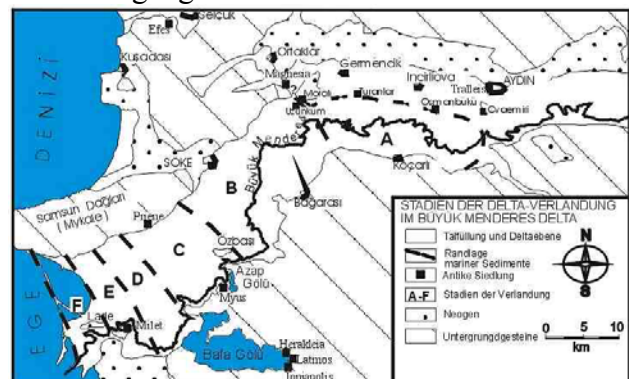
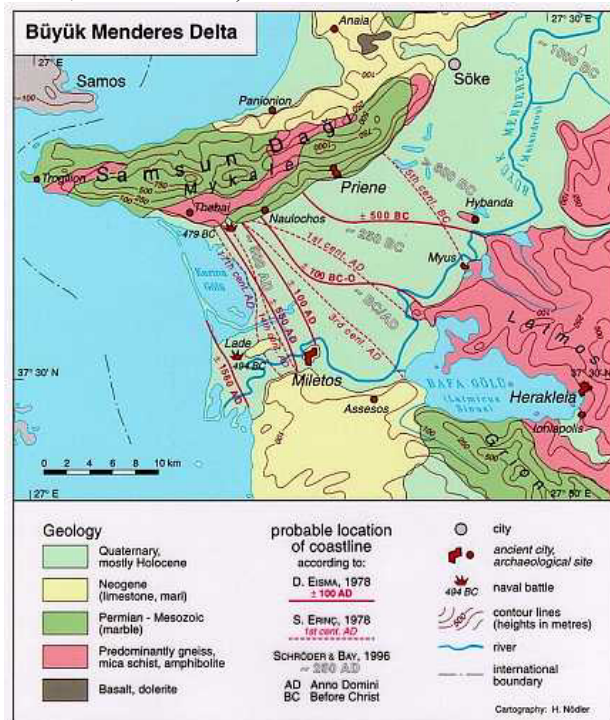


Abbildung 137: Delta-Verlandungsstufen A-F, ermittelt aus historischen Daten (BAY 2002)

Möglicherweise galt dies auch für Magnesia am Mäander. Umgekehrt bedeutet dies aber, dass zum einen der Transport auch großer Marmorobjekte (und anderer Werksteine) mittels Schiff bis direkt an die Zielorte recht leicht zu bewerkstelligen war. Zum zweiten lagen wichtige Steinbrüche der Region (Heraikleia sowie die südlich davon gelegenen Brüche „Milet-West“ und „Milet-Ost“) ebenfalls direkt am Meer, so dass ihre Produkte zumindest für die regionale Versorgung mittels Schifftransports leicht verfügbar waren. Es ist zu vermuten, dass auch für Troja, Pergamon, Ephesos etc. eine Transportsituation bestand, die zumindest günstiger war als das heutige Landschaftsbild vermuten lässt.

6.4.2 Geologischer Überblick der Mäandertalregion

Das Menderes-Massiv ist die beherrschende geologische und morphologische Baueinheit Südwestanatoliens (Abbildung 139). Zahlreiche Untersuchungen haben im letzten Jahrzehnt die Vorstellungen über seine äußerst komplexe geologische Struktur stark verändert, viele Fragen bleiben aber noch zu klären. Diese kurze Übersicht kann keineswegs beanspruchen, den im Fluss befindlichen aktuellen und kontrovers diskutierten Kenntnisstand wiederzugeben. Insbesondere seit der Entdeckung von Hochdruck-Blauschiefermineralen (OBERHÄNSLI *et al.* 1998a; OBERHÄNSLI *et al.* 1998b; CANDAN *et al.* 1999; RING *et al.* 1999b) ist die auf DÜRR (DÜRR 1976; DÜRR *et al.* 1978) zurückgehende Vorstellung einer einheitlichen Entwicklungsgeschichte von Menderes-Massiv und dem Kykladischen Komplex äußerst umstritten (vgl. RING *et al.* 1999a; GESSNER 2000; OKAY 2001).



Quelle: BRÜCKNER 1998, Fig. 6a

Abbildung 138: Geologie des westlichen Menderes-Gebietes und Entwicklung der Küstenlinie des Büyük Menderes Deltas (BRÜCKNER 1999)

Im Süden wird das Menderes-Massiv im Anschluss an einen parallel verlaufenden Gürtel der Kykladischen Blauschieferinheit (RÉGNIER *et al.* 2003) von den Lykischen

Decken begrenzt, allochthonen mesozoischen Sedimentgesteinen, die von aufgeschobener peridotitischer Ozeankruste beeinflusst wurden. Im Nordwesten schließt die Bornova-Flysch-Zone an, mit Flyschgesteinen aus der oberen Kreide bis Paläozän, die von großen mesozoischen Kalksteinblöcken durchsetzt sind. Nach Westen setzt sich das Menderes Massiv in den (Attisch-) Kykladischen Komplex fort, mit dem zumindest in Bezug auf die Marmorhülle Ähnlichkeiten bestehen (vgl. Abbildung 141). Er enthält eoazäne metamorphe Gesteine in Blauschiefer- und Eklogit-Fazies. Unterdessen wird die gemeinsame tektonometamorphe Entwicklung des Kykladischen Komplexes und des NW-Teils des Menderes-Komplexes (Selçuk, Torbali, Dileki-Halbinsel) betont (CANDAN *et al.* 1999; GESSNER 2000), und als Grenze zwischen beiden Komplexen wird nun der Büyük-Menderes-Graben angegeben (OKAY 2001). Demzufolge sind bereits der Samsun-Dağ mit Priene und die vorgelagerten Inseln (Samos, Phourni, Ikaria) nicht mehr als Ausläufer der Menderes-Marmorhülle anzusehen, da das Menderes Massiv auf eoazäne Barrovian Regionalmetamorphose zu beschränken sei.

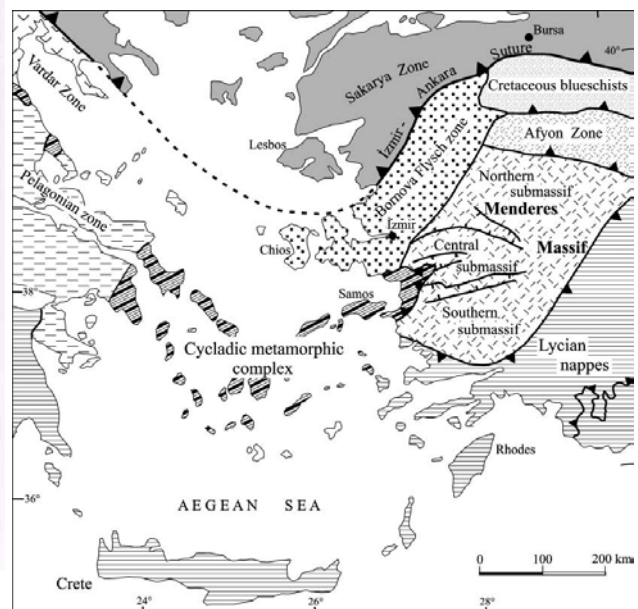


Abbildung 139: Tektonische Karte der Ägäis und des Menderes-Massivs (OKAY 2001)

In Ost-West-Richtung verlaufende neogene Gräben (Gediz-, Küçük Menderes- und Büyük Menderes-Graben) unterteilen das Men-

deres Massiv in eine nördliche, zentrale und südliche Einheit, das Gördes-, Ödemis- und Çine-Submassiv. Dass es sich um heute noch aktive Systeme handelt, wird auch im mit ihnen verknüpften enormen geothermischen Potential deutlich (KARUL 1988; OZGUR & PEKDEGER 1994; DAHMS *et al.* 1998; PEKDEGER & GIESE 1998; OZLER 2000; SIMSEK 2003).

In der klassischen Vorstellung besteht das Menderes Massiv aus einem unregelmäßig domartig aufgewölbten Kernbereich hochmetamorpher Gesteine, vermutlich präkambrischen Ursprungs. Darüber legt sich eine Hülle aus niedriger metamorphen Gesteinen; in ihren inneren Teilen als Schieferhülle, nach außen hin als Marmorhülle ausgebildet. Allerdings ist dieses anschauliche „Zwiebelschalenmodell“ für das Massiv in seiner Gesamtheit nicht mehr haltbar. Vielmehr gibt es z.B. Anzeichen einer invertierten Struktur, wie sie im Aydin-Gebirge und bei Bozdağ beobachtet werden kann (Abbildung 140), aber kontrovers diskutiert wird (GESSNER *et al.* 2002; OKAY 2002).

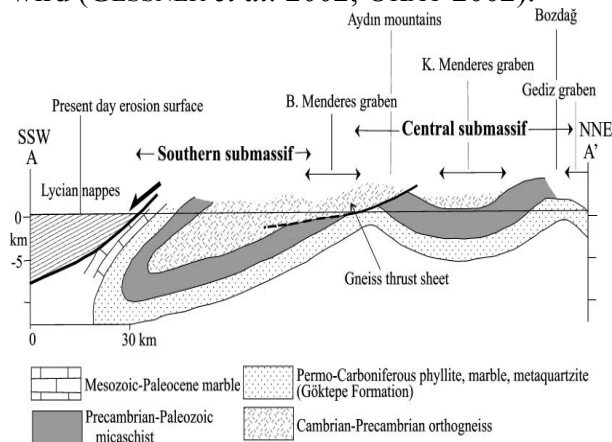


Abbildung 140: Stark vereinfachter N-S-Schnitt durch das Menderes-Massiv (OKAY 2001)

Trotzdem kann für das Gebiet um den Bafa-See, das von dem Çine-Submassiv bestimmt wird, die Gruppierung der Schiefer- und Marmoreinheiten um den Gneiss-Kern als im Wesentlichen zutreffend betrachtet werden.

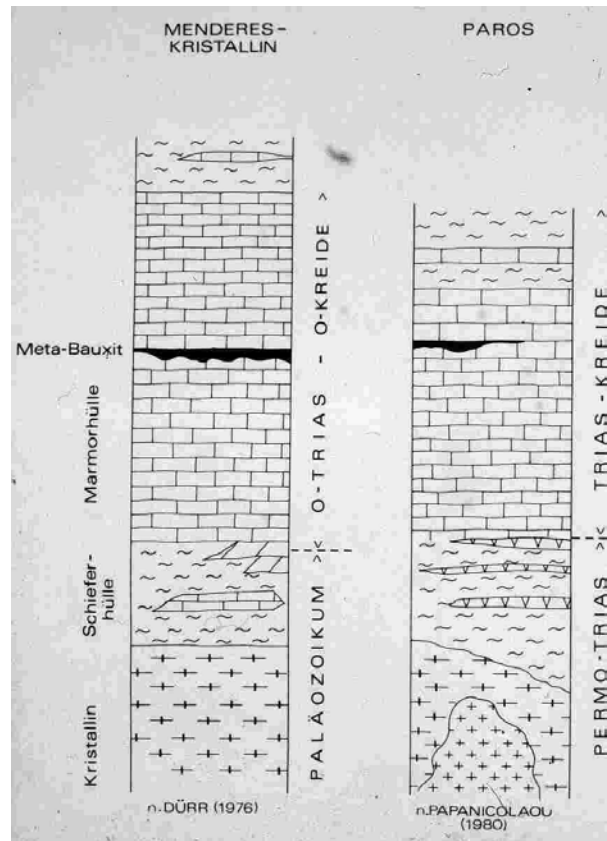


Abbildung 141: In ihrer zeitlichen Einordnung nur noch bedingt zutreffende stratigraphische Position von Gesteinen des Menderes-Kristallins und von Paros (nach DÜRR 1976 links und PAPANICOLAOU 1980 rechts)

Der Kern besteht aus grobkristallinen Orthogneisen, die randlich in feinkörnige Paragneise mit Amphibolit-Bändern übergehen. Heute wird davon ausgegangen, dass es sich um Metagranite einer Pan-Afrikanischen Plattform handelt, die vor etwa 550 Millionen Jahren entstanden sind. Der Vorstellung eines sedimentären Protolithen für den Augengneiskern wird von manchen Autoren ein wesentlich jüngeres granitoides Ausgangsgestein gegenübergestellt, das während des Tertiärs intrudierte (BOZKURT 2001).

Südlich reicht der Kern bis an das N-Ufer des Bafa-Sees, wo er in Form von Augengneisen zu Tage tritt. Postkristalline tektonische Beanspruchung prägte ihm ein orthogonales Trennflächenmuster mit ± Nord-Süd verlaufenden vertikalen Schieferungsflächen auf, die von einer ost-westlich verlaufenden Querkluft-Schar sowie oberflächenparallelen Entspannungsklüften begleitet werden. Das Trennflächensystem zeigt häufig Abweichungen in NNW-Richtung. Der Verwittere-

rungsangriff folgt diesen Schwächungszonen im Gesteinsverbund und bringt neben den typischen „Wollsack“-ähnlichen Formen auch die steil aufsteigenden, gezackten Strukturen des Beşparmak-(Fünffinger-) Gebirges hervor. Ein großer Teil der Architektur von Herakleia und Latmos ist aus diesem Material errichtet worden, das Baugrund und Kulisse dieser antiken Stätten bildet (vgl. Abbildung 142). Auch in Gneissausbissen im Sedimentgestein am NW-Ufer des Bafa-Sees bei Myus wurden Gneisblöcke für die 8 km lange Stadtmauer von Milet gebrochen (SCHRÖDER & YALÇIN 1991).



Abbildung 142: Blick von Herakleia auf das Latmos-Gebirge; im Vordergrund antike Mauer aus Gneis

Das senkrecht aufeinanderstehende System leichter Trennbarkeit der Augengneise schuf sowohl günstige Voraussetzungen für den leichteren Abbau der Gesteinsblöcke als auch für die Fundamentierung der Einzelgebäude. Viel spricht dafür, dass es die Entwicklung des an NS-EW-Richtungen orientierten Stadtplanungskonzepts (GERMANN 1981) wesentlich beeinflusste, das in der hellenistischen Blütezeit insbesondere seit Hippodamos systematisiert wurde.

Die sich – vereinfacht formuliert – um die Kerngneise legende Schieferhülle enthält östlich des Bafa-Sees basale Biotit-Quarz-, Granat-Chloritoid- und Chloritoid-Schiefer, die lateral von sehr mächtigen quarzitischen Folgen vertreten werden können. Daran schließt sich eine Serie von Glimmer- und Kalkschiefern an, in die die mehrere hundert

Meter mächtigen Calcitmarmorlinsen der herakleiotischen Brüche bei Buçak, aber auch dolomitische Bereiche, eingeschaltet sind. Den Abschluss im Hangenden bilden Schiefer, Metagrauwacken, -lydite und -konglomerate.

Innerhalb der grünschieferfaziellen Gesteinsfolgen nimmt der Metamorphosegrad vom Kern Richtung Marmorhülle ab. Eine Rekonstruktion der stratigraphischen Abfolge wird jedoch durch starke isoklinale Verfallungen im cm- bis 100-m-Bereich erschwert. Der paläozoischen Schieferhülle folgt die Marmorhülle mit bis zu mehreren tausend Meter mächtigen Metasedimenten (Obertrias bis Oberkreide). Sie wird auch als Milas-Marmor bezeichnet (DÜRR 1975) und erstreckt sich vom Bafa-See nach SE über Milas, Yatağan, Muğla, nördlich und südlich der Göktepe-Formation und Aphrodisias bis über Denizli hinaus (Abbildung 143).

Lokal liegen ihr rote, pelagische Marmor- und Kalksteinhorizonte sowie detritische Flysch-Gesteine (Obere Kreide bis frühes Eozän) auf (GÜNGÖR & ERDOĞAN 2002). Im Gebiet von Selçuk (Ephesos) und Kavaklıdere (nördlich von Muğla) finden sich in den Marmoren mafische Vulkanite eingeschaltet (GÜNGÖR & ERDOĞAN 2002). Obwohl beide Autoren diese Gebiete dem Menderes-Massiv zuordnen, schließen sie aufgrund des alkalinen Charakters der vulkanischen Gesteine der Çaltaşı-Formation bei Kavaklıdere auf einen während der späten Trias durch Extensionstektonik hervorgerufenen Intraplattenvulkanismus. Demgegenüber weist der tholeiitische Charakter der Vulkanite der Selçuk-Formation auf aufgeschobene mittelozeanische Kruste (MORB) hin.

Nach dem oben Gesagtem können die westlich gelegenen Marmorformationen im Samsun-Dağ bis zu den Inseln Samos, Phourni und Ikaria ebenso wie die Marmorvorkommen zwischen Selçuk und Magnesia nicht als unmittelbare Ausläufer der „Menderes-Marmorhülle“ angesprochen werden, sondern müssen zum Kykladen-Komplex gestellt werden.

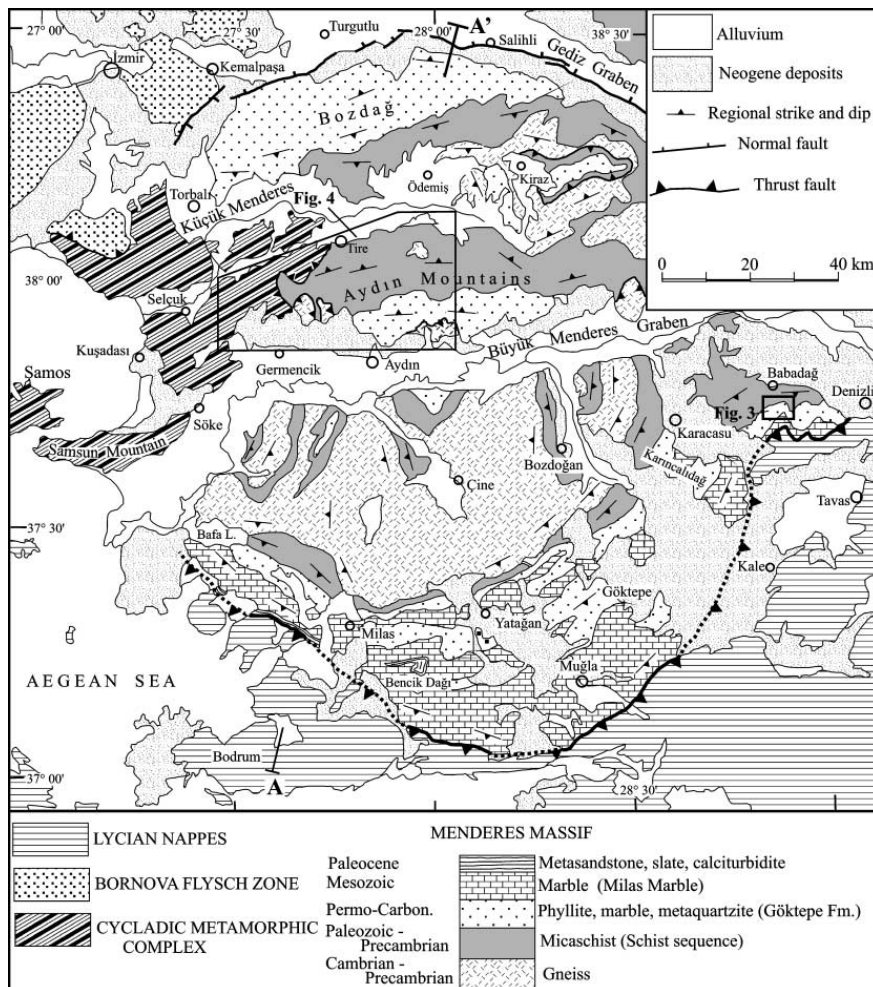


Abbildung 143: Geologische Karte des Menderes-Massivs (OKAY 2001)

6.4.3 Überblick beprobter Marmorlagerstätten der Menderesregion

Entsprechend dem aktuellen geologischen Kenntnisstand (Abbildung 143) konnte Probenmaterial aus folgenden Bruchgebieten – meist mit antiken Abbauspuren – der Menderes-Marmorhülle ausgewertet werden (von West nach Ost): Bafa-See (bei Myus, östlich von Myus am NW-Ufer gegenüber Burgass Adasi, Herakleia, Milet-Ost, Milet-West), Euromos, Milas, Brüche bei Stratonikeia, vereinzelt Platten aus moderner Abbautätigkeit bei Yatağan und Muğla, sowie Aphrodisias (Abbildung 144 sowie Übersicht in Abbildung 16 und Abbildung 17 auf S. 51). Dem Kykladischen Komplex entstammt Probenmaterial vom Samsun Dağ (der „Mykale“ mit Priene), den Phourni-Inseln sowie eine größere Anzahl von Paros und Naxos aus früheren Projekten (GERMANN *et al.* 1988). Aber auch Material aus dem Aydın-Gebirge 20 km nördlich von Magnesia am Mäander sowie von mehreren Lokalitäten bei Ephesos

ist diesem geologischen Komplex zuzuordnen.

Insgesamt weisen die Marmore aus beiden geologischen Einheiten eine große Spannweite an Merkmalen auf, die sowohl innerhalb einer Lagerstätte als auch zwischen den Lagerstätten beträchtlich überlappen können. Neben rein weißen Marmoren mit meist homogenem Korngefüge sind auch dunklere Marmore mit hohen Anteilen an akzessorischen Mineralien vertreten (Dolomit, Quarz, Glimmer, opake eisen- und manganhaltige Mineralien, kohlige bis graphitische Umwandlungsprodukte organischen Ablagerungsmaterials). Sie treten häufig in unregelmäßigen Bänderungen mit gräulichen bis rötlichen Farbtönen auf und markieren in einigen Fällen den Übergang zu den Buntmarmoren (z.B. den roten Milas Bordo = „Bordeaux“).

Es lässt sich fragen, inwieweit die Unterscheidung der Marmore nach beiden geologischen Komplexen auch archäometrisch

sinnvoll ist. Die entgegen dem bisherigen Gebrauch erfolgte Trennung des Gebiets um den Bafasee vom Samsun-Dağ (u.a. Priene) spricht dagegen, zumal sich die Eigenschaften der Marmore nicht deutlich nach beiden Gebieten unterscheiden lassen. Allerdings fällt auf, dass keine Marmorprobe mit hoch positiver Kohlenstoffisotopie ($\delta C > 3,8$) der von Okay definierten Milas-Marmorhülle angehört, sondern meist dem erweiterten Attisch-Kykladischen Komplex (Paros-

Lychnites, Phourni, Ephesos, Magnesia/Mäander). Daneben weisen auch einige Proben von Eski Maden im Kozak sowie dem thessalischen Atrax diese stark positive Kohlenstoffisotopie auf; ebenso wie manche Messwerte von Marmara, Naxos und Sardis (HERZ 2003, pers. Mitt.). Die Marmore von Sardis mit wohl nur lokaler Bedeutung liegen der Kiraz-Decke am Gediz-Graben auf (GOKTEN *et al.* 2001). Vgl. auch die Isotopendiagramme in Kapitel 7.2.

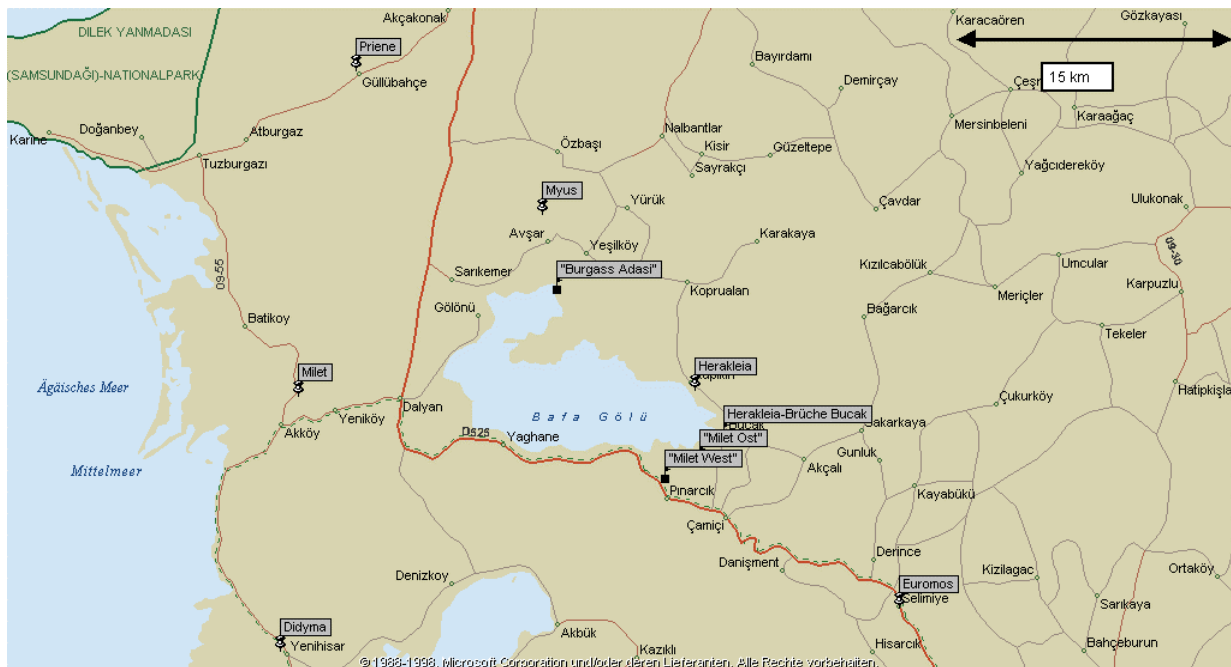


Abbildung 144: Antike Plätze und beprobte Marmorlagerstätten um den Bafa-See

6.4.4 Die Marmore am Ostufer des Bafasees (Herakleia, Milet Ost und West)

Die Untersuchungen bestätigen die überraschende Bedeutung der Marmorbrüche von Herakleia, Milet West und Milet Ost (Abbildung 144) für die antiken Bauwerke und Skulpturen von Milet und Didyma. Die Brüche wurden in der Vergangenheit eingehend untersucht und beschrieben (GERMANN 1981; PESCHLOW-BINDOKAT 1981). Probenmaterial, Dünnschliffe und Messdaten der damaligen Untersuchung konnten in die laufende Untersuchung einbezogen werden. Die meisten hier verwendeten Angaben stammen aus beiden Publikationen, ohne dass das immer einzeln aufgeführt wird.

Das größte Bruchgebiet ist das von **Herakleia**, das den bereits von Vitruv beschrie-

benen *marmor heracleoticum* lieferte, dessen Wertschätzung und überregionale Bedeutung im Edikt von Diokletian mit 75 Dinar je Kubikfuß (prokonnesischer Marmor 40 Dinar) zum Ausdruck kommt. Die Brüche liegen bei Buçak (heute Gölyaka), und nur eine dem Transport keine wesentlichen Hindernisse entgegenstellende Hangebene trennt sie vom Ostufer des Bafa-Sees. Das Verbreitungsgebiet der Marmore ist hier geringer als am Südufer, aber sie weisen eine hohe Mächtigkeit, Kompaktheit und ein beachtliches Abbauvolumen auf. Insgesamt dürften unter Hinzurechnung des Abraums 200.000 m³ Gesteinsmasse bewegt worden sein⁵⁵. Diese

⁵⁵ Peschlow-Bindokat zitiert als Vergleichswerte für die phrygisch-dokimenischen Brüche 500.000 m³, für die pentelischen 400.000 m³ (1980, S. 208).

Mengen gingen weit über den Bedarf von Herakleia und auch der Stadt Latmos hinaus, zumal dort vor allem die unmittelbar anstehenden Augengneise als Baumaterial verwendet wurden. Bis auf geringe Ausnahmen (so die höhergelegene Bruchstelle 5) sind die 5 Hauptbruchgebiete sowie kleinere Abbaustellen erschöpft; liegengebliebene Werkstücke sind kaum vorhanden.

Während die Herakleia-Brüche als Einschaltungen in der Schieferhülle auftreten, sind die südlich gelegenen milesischen Brüche schon Teil der eigentlichen „Marmorhülle“. Beide Gebiete sind durch die eozäne Selimiye-Scherzone getrennt. Für den nördlichen Bereich mit niedriger Amphibolizonefazies werden Bildungsbedingungen um 7 kbar bei $>550^{\circ}\text{C}$ angegeben, für die schwächer metamorphisierte südliche Einheit (Grünschieferfazies) Drücke unter 4 kbar und Temperaturen unter 525°C (RÉGNIER *et al.* 2003).

Aus bauxitischen Sedimenten hervorgegangene Aluminiumoxide treten im gesamten Verbreitungsgebiet als Diasporite ($\alpha\text{-AlOOH}$) bzw. als Korundite (Al_2O_3) auf. Korundgesteine belegen hohe metamorphe Bildungstemperaturen und sind Hauptbestandteil der sehr harten Smirgelgesteine, die nach der Stadt Smyrna, dem heutigen Izmir, benannt sind. Seit Alters her sind diese Meta-Karstbauxite als Schleifmaterial – auch für die Bearbeitung von Marmoroberflächen – verwendet worden, das im Umfeld höhermetamorpher Schiefer und Marmorlagerstätten auftritt (vgl. Einleitung von Kapitel 2.5.6).

Anders als der Name Marmorhülle vermuten lässt, beschränken sich die abbauwürdigen Lagerstätten auf meist linsenförmige, geringflächige Einschaltungen am Südostufer des Bafasees mit je einem von der Mersinet-Ebene unterteiltem östlichen und westlichen Bruchgebiet. Zu dem kleineren **östlichen Bruchgebiet** gehören die Brüche am Lefka-Bur-Dağ, mit dem im Nordteil der östlichsten Erhebung gelegenen Großen Bruch und einigen kleineren Brüchen westlich davon. Sie enthalten wesentlich mehr liegengebliebene Säulen als das bedeutend größere **westliche Bruchgebiet**, das teilweise bis an das Seeufer heranreicht. Am Nordost-Hang des Zey-

tin-Dağ finden sich 4-40 m lange und 3-30 m tiefe Brüche mit bis 15 m hohen Schrotwänden (Abbildung 145).



Abbildung 145: Schrotgräben in den Milet-West-Brüchen

Am Westhang der östlich gelegenen Erhebung finden sich ebenfalls Brüche, wobei eine bearbeitete Felswand 150 lang und 8 m hoch ist und weißen Marmor guter Qualität aufweist. Weitere Brüche im westlichen Bruchgebiet liegen in der Nähe der Insel Kahve Asar Adasi. Die größte Bruchstelle dort misst 70 m Länge und ist bis 10 m hoch. Im Norden und Süden wird das Verbreitungsgebiet der milesischen Marmore von Glimmerschiefern begrenzt. Die Mächtigkeiten der Marmorbänke lassen sich wegen des starken isoklinalen Faltenbaus, der die Lagen zergliedert hat, nur schwer abschätzen, liegen aber meist unter 25 m, erreichen gelegentlich jedoch auch 50 m. Bedingt durch Trennflächen überschreitet die maximale Blockgröße der Werkstücke im gesamten Bruchgebiet am Bafa-See selten 2 m⁵⁶.

Richtung Westen und Südwesten nehmen sowohl der Reinheits- als auch der Metamorphosegrad ab, die Marmore werden feinkörniger und zeigen vermehrt dunkle Bänderungen. Auch nichtmetamorphisierte Kalke kommen vor, die neben Marmoren Verwendung in lokalen Kalkbrennereien (Abbildung 146) finden und auch beprobt wurden.

⁵⁶ Allerdings beschreibt A. Peschlow-Bindokat (1980, S. 192) 2 Eckarchitrave mit 6 m Länge.



Abbildung 146: Kalkbrennofen in den Milet-West-Brüchen. Die Altreifen dienen als Brennmaterial zur Kalkgewinnung

Unter den Brüchen im Osten des Bafa-Sees zeichnen sich die Herakleia-Marmore infolge des höheren Metamorphosegrads durch die größten Korndurchmesser (MGS 4 mm) und die geringsten Anteile an akzessorischen Mineralien aus. Die Brüche von Milet-Ost (Lefka-Bur-Dağ) weisen den geringsten Metamorphosegrad auf und sind infolgedessen feinkörniger (MGS 1,2 mm). Zudem besitzen sie einen erhöhten Anteil an akzessorischen Mineralien und besonders dolomitischen Lagen, die die nutzbaren Blockgrößen zusätzlich einschränkten und mitverantwortlich für die große Zahl im Steinbruch liegende Werkstücke sein dürften (Abbildung 147)⁵⁷.



Abbildung 147: Beschädigte Säule in den Milet-Ost-Brüchen

Soweit sie doch den Weg bis an den Bestimmungsort schafften, sind sie am Bauwerk dank ihres charakteristischen positiven Verwitterungsreliefs, stärkerer Sprödigkeit und

⁵⁷ Dies wird von A. Peschlow-Bindokat bestritten (1980, S. 192).

Gelb- bis Braunfärbung infolge höherer Eisengehalte unschwer zu identifizieren.



Abbildung 148: Dolomitische Strukturen im Calcitmarmor des Sofakapitells des Adyton im Apollontempel von Didyma und an Marmorblock des östlichen Bruchgebietes (in PESCHLOW-BINDOKAT 1981).



Abbildung 149 oben: Dünnschliffaufnahme der mittel-grobkörnigen, homogenen Herakleia-Marmorvariante im Markttor von Milet. Darunter feinkörniger Marmor vom kleinen Gipfelbruch von Milet Ost (kurze Kante = 2,4 mm)

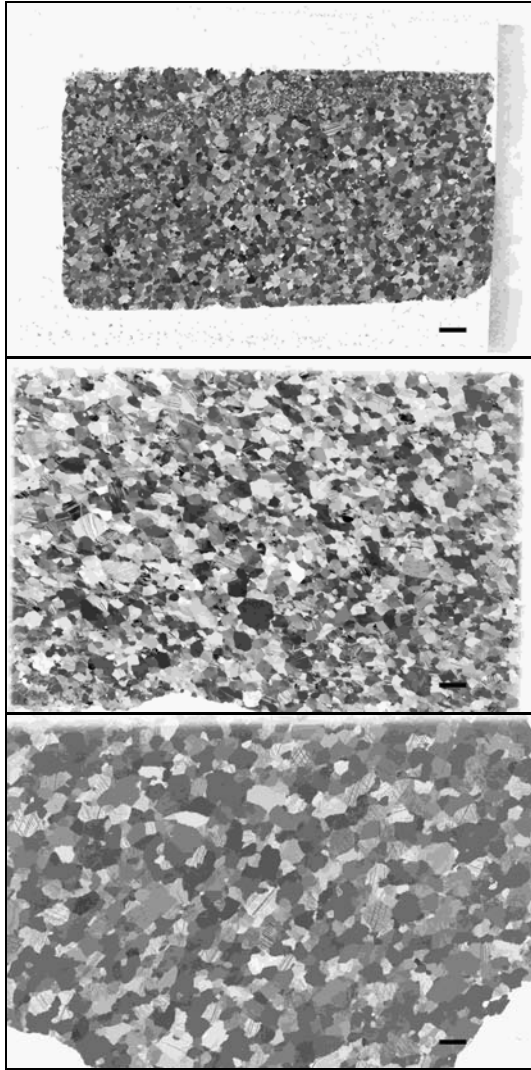


Abbildung 150: Dünnschliffaufnahmen von Marmoren aus Milet Ost, Milet West und Herakleia (oben nach unten), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Die Marmore des westlichen Bruchgebietes nehmen eine Mittelstellung zwischen denen von Herakleia und dem östlichen Bruchgebiet ein.

Treffen diese Aussagen auch für die Mehrzahl der Marmorproben zu, verkomplizieren eine Reihe von Ausnahmen und Überlappungen doch das Bild. Insbesondere bei den Herakleia-Marmoren zeigen sich häufig auch dunklere, gebänderte und feinkörnige Bereiche (Abbildung 26). Die dunkleren Bereiche können beim Anschlagen einen starken Ge-

ruch nach H_2S ausströmen, ein Merkmal, das jedoch z.B. bei prokonnesischen Marmoren auch für die hellweißen Marmore gilt.

Einige der Marmore des östlichen Bruchgebietes erreichen auch etwas größere Korndurchmesser bis 2 mm (MT12) und manche Marmore des westlichen Bruchgebietes gar Korngrößen bis 3,8 mm. Wie in Abbildung 150 Mitte erkennbar, weisen deren grobkörnigere Varianten jedoch ein heterogeneres Korngefüge auf, d. h. hier konnte aufgrund nicht ausreichend lang andauernder höherer Metamorphosegrade die Kornvergrößerung nicht alle Kristalle erfassen (s. Diskussion zum Rathaus (Schildakroter) von Milet in 7.3.4).

Generell sind jedoch die hellweißen Marmore von Herakleia grobkörniger als die hellweißen Marmore des östlichen und auch des westlichen Bruchgebietes (vgl. auch Tabelle 32 auf S. 212). Und nur bei den Herakleia-Marmoren konnten auch in dunkleren Partien Korndurchmesser über 2 mm beobachtet werden.

6.4.4.1 Geochemische Merkmale

Isotopengeochemisch besteht zwischen allen drei Marmorvorkommen eine ausgeprägte Überlappung (Abbildung 151). Die beiden Werte mit negativerer Sauerstoffisotopie gehören zu den Brüchen vor der Insel Kahve Asar Adasi im westlichen Bruchgebiet.

Auch die sonstigen geochemischen Merkmale der Marmore am Ostufer des Bafa-Sees überlappen stark. Hierbei zeigen die Proben von Herakleia bei insgesamt niedrigeren Spurenelementgehalten eine größere Homogenität (vgl. auch Tabelle 32 auf S. 212). Zum Vergleich wurden in zwei Diagrammen (Abbildung 152 und Abbildung 153) Messwerte von Milas-Marmoren aufgenommen.

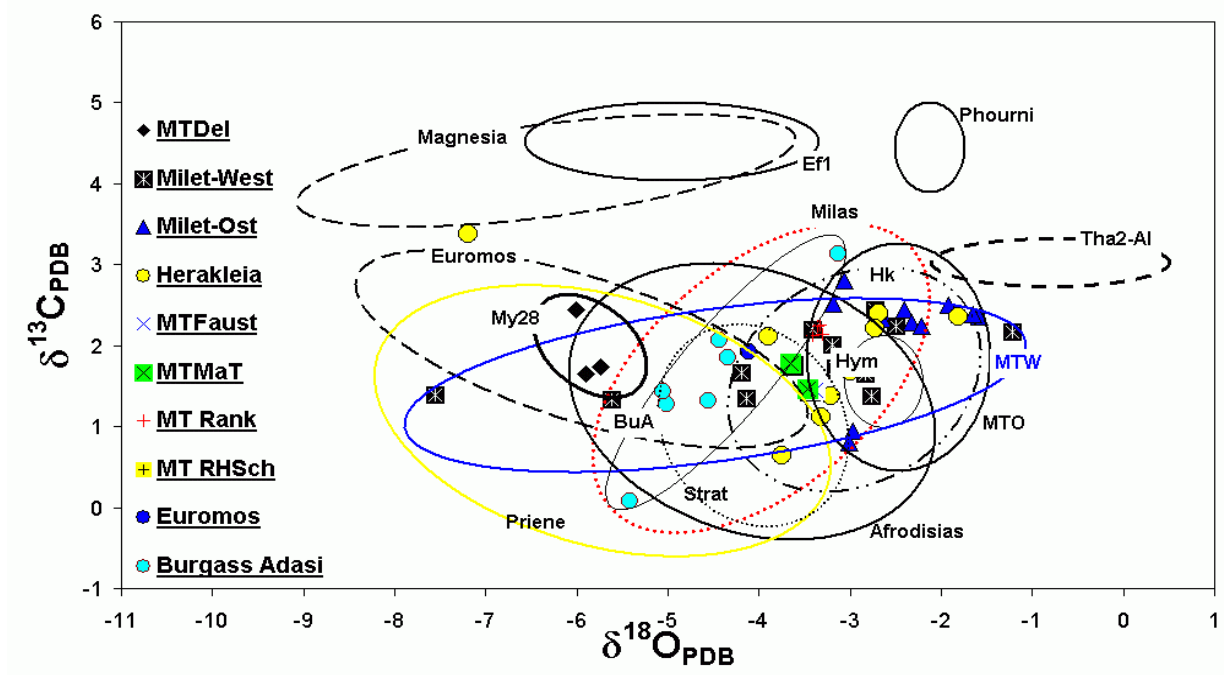
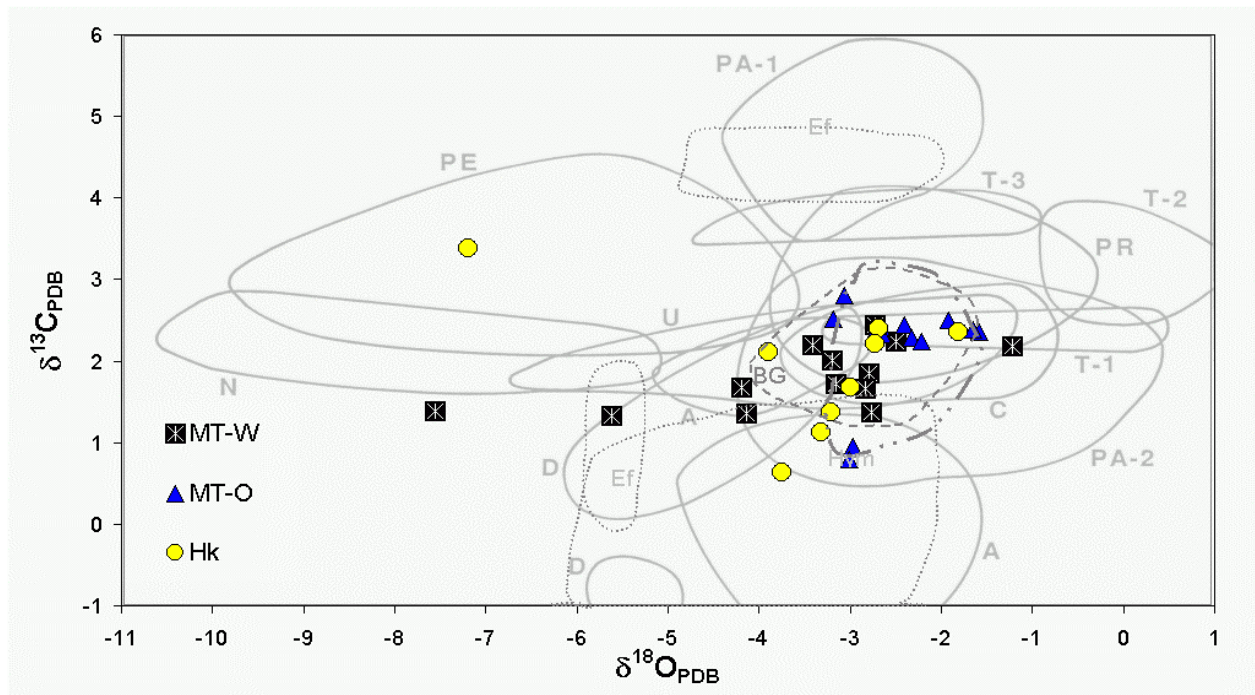


Abbildung 151: Sauerstoff-Kohlenstoff-Isotopie der Marmore von Brüchen am Bafa-See (BG mit Herakleia, Millet Ost und West), einfach gestricheltes BG-Feld nach (HERZ 1987). Darunter Isotopenfelder aus eigenen Messwerten von Lagerstätten und ihnen zugeordneten Museumsobjekten

6.4.5 Euromos



Abbildung 158: Römische Tempelanlage von Euromos

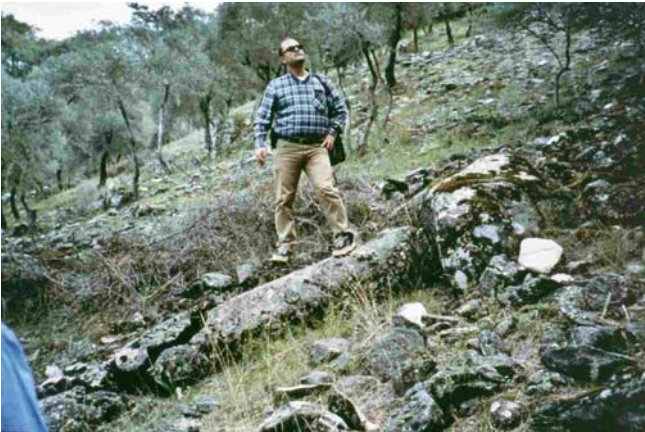


Abbildung 159: Liegende Säule zwischen Tempel und Brüchen von Euromos. Dahinter M. Colak, Universität Izmir



Abbildung 160: Marmorfragmente am Tempel mit feinschichtiger Bänderung

Eine weitere Tempel- und Stadtanlage, für deren Bau ausreichend lokal anstehender Marmor zur Verfügung stand, ist Euromos östlich des Bafasees (Karte Abbildung 144). Teile des in der ersten Hälfte des 2. Jh. u.Z. errichteten Tempels sind nicht fertiggestellt worden (Abbildung 158). **Antike Brüche** finden sich unter anderem auf einem Berghang (Abbildung 159) direkt oberhalb des Tempels. Die hell-

dunkel gebänderten Marmore werden oft von zahlreichen dünnen, scharf hervortretenden Minerallagen durchzogen, auch die niedrigen Mg- und Dolomitmesswerte sprechen gegen deren Bildung durch Dolomit. Eine relativ geringe Qualität und begrenzte Vorräte dieses Marmors haben seine überregionale Verbreitung sicher stark eingeschränkt. Eine im Museum von Milas ausgestellte Säule entspricht jedoch lithologisch dem Euromos-Marmortyp.

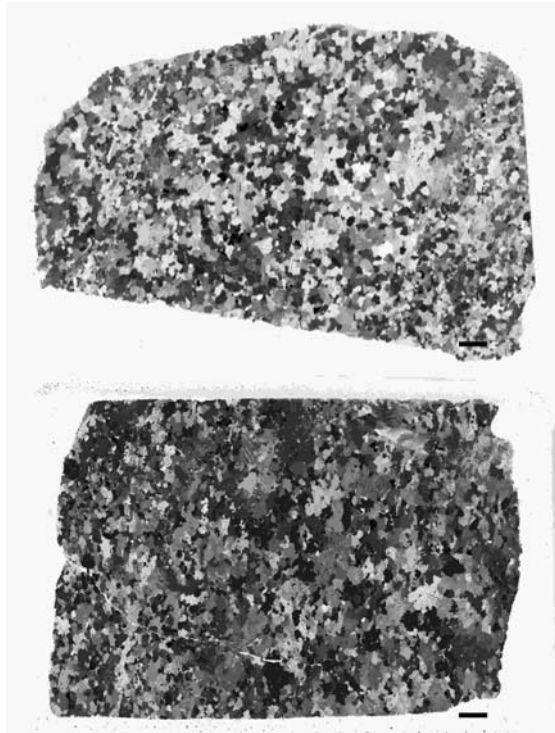


Abbildung 161: Heterogenes Gefüge von Euromos-Marmoren (oben EuP6, u. Eu01), N+, Maßstabsbalken 2 mm

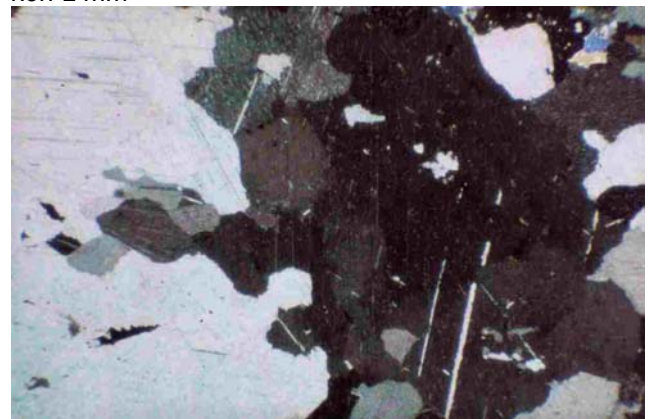


Abbildung 162: Geringe Deformationserscheinungen und buchtige Korngrenzen der Euromos-Marmore, N+, kurze Kante 4,8 mm

Äußerlich ähneln die Euromos-Marmore denen von Stratonikeia, aber bei vorwiegend grauem statt rotem Farbton der eher dünnen parallelen Bänderungen. Unter dem Mikroskop zeigen sie

ein feinkörniges, oft nur schwach heterogenes Gefüge; aber auch deutlich heterogene Korngrößenverteilung (MGS 1-2,6, AGS um 0,5 mm), Schichtung und Kornorientierung sind erkennbar (Abbildung 161), jedoch wenig Deformationserscheinungen (Abbildung 162). Der Dolomitanteil ist gering (< 1 Gew%), die Gehalte an Sr (111-318 ppm) und Fe (374-917 ppm) sind höher, an Mn niedriger (3-72 ppm); die negative Cer-Anomalie ist fast verschwunden (0,87-1,1; Stratonikeia: 0,46-0,87).

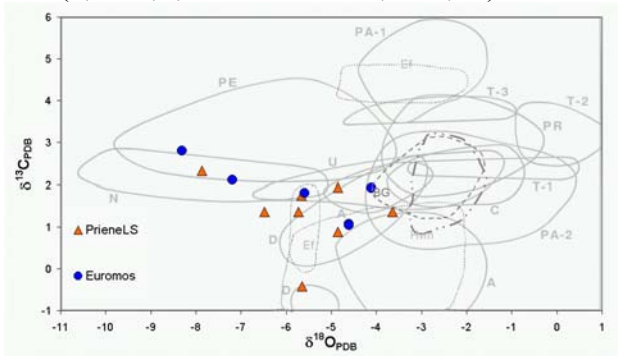


Abbildung 163: Isotopendiagramm von Marmoren von Euromos und Priene mit starker Überlappung

Isotopisch lassen sich die Euromos-Marmore nicht von ähnlich aussehenden Marmoren (Priene, Stratonikeia) abgrenzen, berühren das Feld der Marmore am Ostufer des Bafa Sees (BG) aber nur ansatzweise. Sie weisen jedoch deutlich erhöhte Mn-, Fe- und Sr-Gehalte auf.

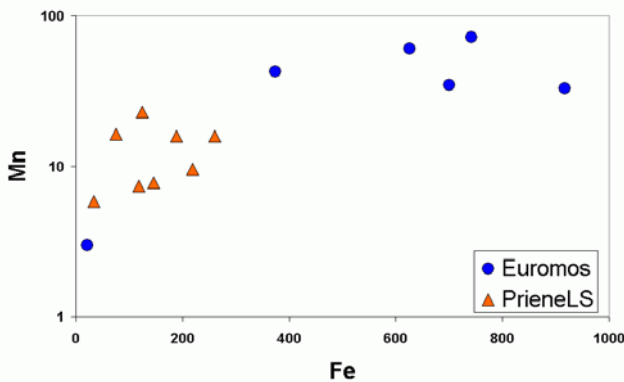


Abbildung 164: Euromos-Marmore mit i.d.R. höheren Fe- und Mn-Gehalten als die lithologisch ähnlichen Priene-Marmore

Ohne auf weitere Details einzugehen, zeichnen sich die Euromos-Marmore durch das Fehlen einer negativen Cer-Anomalie aus, wie in Abbildung 166 im Vergleich zu den lithologisch ähnlichen Marmoren von Priene deutlich wird.

Im Vergleich z.B. zu den Marmoren des Pergamonaltars als Prototyp prokonnesischer Marmore zeigt sich eine Verarmung an Y, die

in einem hohen $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ Wert um 5 gegenüber 1 zum Ausdruck kommt (Abbildung 167). Ein ähnliches Verteilungsmuster besitzen die Marmore des Waffenreliefs von Pergamon, das sich aber in sonstigen Merkmalen deutlich unterscheidet und möglicherweise aus Marmoren von Lesbos hergestellt wurde.

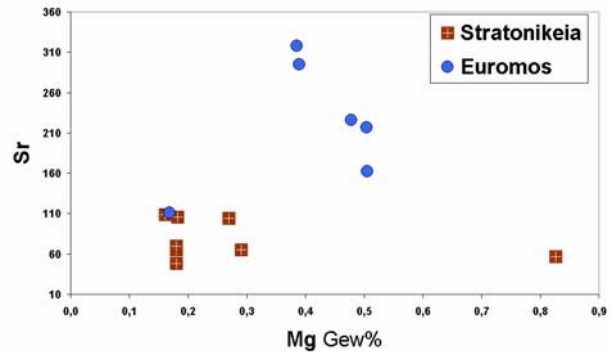


Abbildung 165: Bei insgesamt niedrigen Mg- (Dolomit) Gehalten weisen die Euromos-Marmore gegenüber Stratonikeia höhere Gehalte an Sr auf

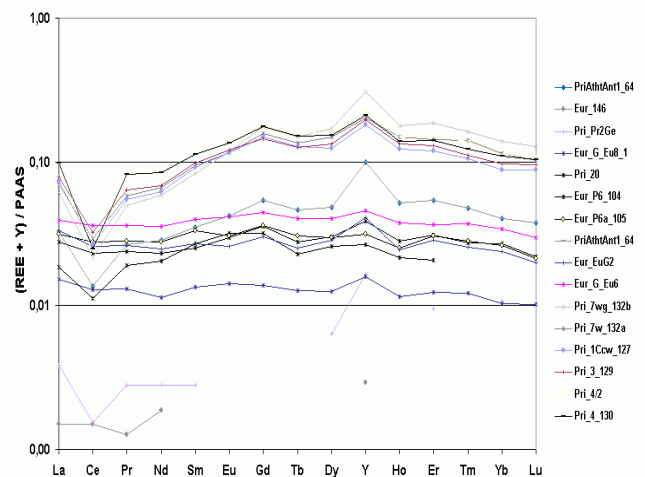


Abbildung 166: SEE-Verteilungsmuster von Marmoren von Priene und Euromos. Letztere sind bei oft niedrigeren Absolutgehalten durch relativ höhere Cer- und niedrigere Y-Gehalte gekennzeichnet, die sich in einem geraden Kurvenzug ausdrücken

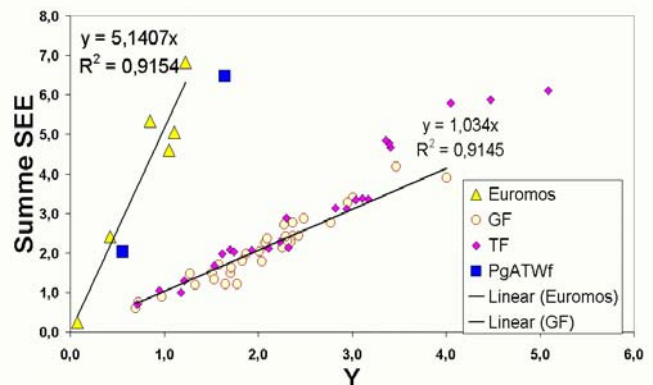


Abbildung 167: $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ von Marmoren von Prokonnesos, Euromos und dem Waffenrelief im Athentempel von Pergamon

6.4.6 Burgass Adasi

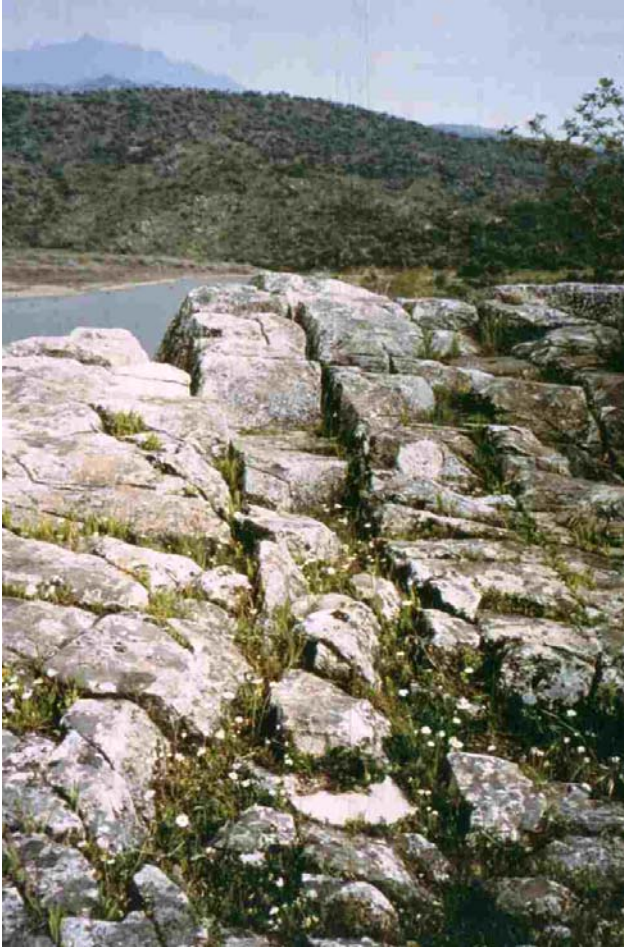


Abbildung 168: Kuppe von Marmorklippe am Bafasee gegenüber Burgass Adasi mit NS-EW verlaufendem Trennflächensystem

An der Straße am Nordwestufer des Bafasees (Karte Abbildung 144, GPS: N 37°33'25'', E 027°25'55'') befindet sich gegenüber der Burgass-Insel eine Marmorklippe (Abbildung 168) mit unverkennbaren antiken Abbauspuren. Das Vorkommen ist nicht sehr groß, hat aber ein breitgefächertes Marmorspektrum hervorgebracht, von denen einige extrem dolomitreich sind.

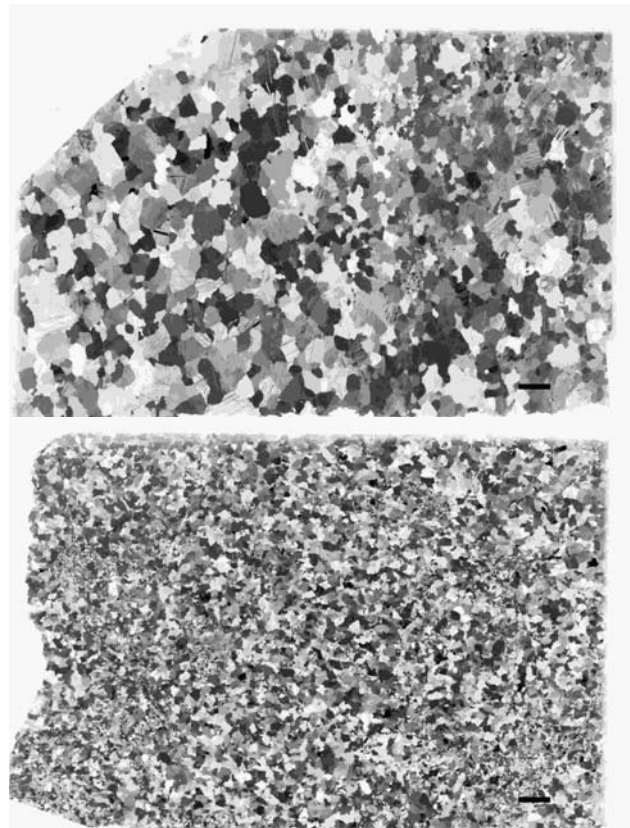


Abbildung 169: Calcitischer Marmor mit Graustreifung (o. BurgAd28) und weißer feinkörniger dolomitischer Marmor (u. BurgAd26) bei Burgass Adasi, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Die maximalen Korngrößen der weißeren calcitischen Marmore erreichen – bei insgesamt geraden bis buchtigen Korngrenzen und kaum entwickelten Zwillingslamellen – bis 2,4 mm, während die dolomitischen Marmore (>90 Gew% Dol.) sehr feinkörnig sind (0,2-1 mm). Neben Mg (0,15-12 Gew%) erreichen auch Fe (200-900 ppm) und Mn (40-90 ppm) außergewöhnlich hohe Werte.

Trotz der starken Schwankungen in der mineralischen und chemischen Zusammensetzung ist das SEE-Verteilungsmuster recht einheitlich ($\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ 2-4, Ce_{neg} 0,4-0,8, Y/Ho 53-87) und deutet bei niedrigen Sr-Gehalten auf beträchtlichen Detrituseintrag hin. Weitere Merkmale werden im folgenden Kapitel (Priene) vergleichend dargestellt.

Zwar konnte keines der Museumsstücke den wenigen erfassten Proben dieses Vorkommen zugeordnet werden. Aber die antiken Abbauspuren, teilweise gute farbliche Qualität des Marmors wie auch die leichte Transportmöglichkeit über See lassen eine Verwendung in antiken Stätten der Umgebung wahrscheinlich erscheinen.

6.4.7 Priene

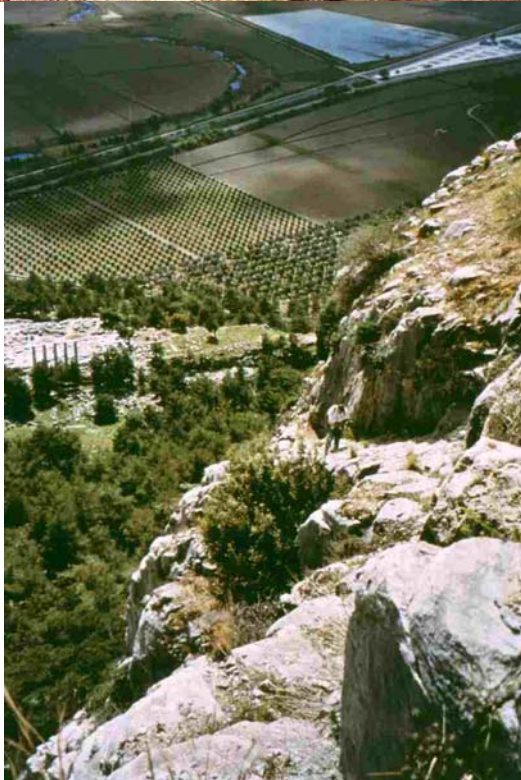


Abbildung 170: Schwer zugängliche Lage Prienes über der Mäandertalebene auf dem Samsun Dağ



Abbildung 172: Antiker Steinbruch am Nordhang Prienes mit liegengebliebener Säulentrommel



Abbildung 173: Antiker Marmorbruch am NE-Hang von Priene



Abbildung 171: Athentempel in Priene mit Säulen aus grauem Marmor

Obwohl Priene (Karte Abbildung 144) als Teil des Samsun Dağ geologisch dem Kykladischen Komplex zuzuordnen ist, wird es aufgrund der geographischen Nähe zum zentralen Unterscuhungsgebiet und besserer Übersichtlichkeit in diesem Abschnitt behandelt. Von beträchtlicher Bedeutung dieser im 4. Jh. v.u.Z. in Blüte stehenden, häufig als Pompej Kleinasiens bezeichneten antiken Stätte waren neben dem Athentempel auch ihre Theateranlage (CHANDLER *et al.* 1769; ROWLEY 1804; SMITH 1900; WATZINGER 1903; WIEGAND & SCHRADER 1904; HILLER VON GAERTRINGEN *et al.* 1906; WIEGAND 1910; WYSS 1912; ASBOECK 1913; GERKAN 1921; RIEMANN 1963; SCHEDE *et al.* 1964;

CARTER 1983; KOENIGS 1983; RAEDER 1984; RUMSCHEID 1998; BAYHAN 2000).

Im Gegensatz zu Milet und Didyma wurde Priene auf **Marmoruntergrund** errichtet. Die Stadtanlage folgt dabei im Wesentlichen dem orthogonalen Trennflächensystem des Marmors. Der hier verwendete lokal anstehende Marmor ist vorwiegend graustreifig (s. a. LAZZARINI *et al.* 1980b) entwickelt und entspricht überhaupt nicht dem Idealbild eines rein weißen Baumaterials. Vielleicht ist dies einer der Gründe dafür, dass sich vergleichsweise ausführliche Literaturangaben zum verwendeten Material finden lassen, so für den Athenatempel: „...bis auf wenige Brecciaquader im Fundament und im Unterbau der Kultbildbasis ganz aus Marmor verschiedener Farbschattierungen von weiß über grau bis graublau, der mit großer Wahrscheinlichkeit am Osthang des Akropolisfelsens an der schon von Kummer verzeichneten Stelle gebrochen wurden, an der tatsächlich alle am Tempel vertretenen Marmorqualitäten vorkommen...in der zweiten Bauphase kommen nämlich in nach Westen zunehmender Häufigkeit Steine mit starken gelben Adern vor, während in der ersten Phase allenfalls feine gelbe Adern zugelassen wurden.“(KOENIGS 1983) (vgl. auch im Athenatempelkapitel Beschreibung von CARTER 1983).

Der hohe Anteil an brekziösem Material deutet auf ursprüngliche heterogene Kalksteinlagen hin, die beim Einsturz von Höhlen vermischt und später metamorphisiert wurden. Stellenweise fanden verkittete Hangschuttbrekzien als Baumaterial Verwendung.

Untergeordnet treten Dolomitlagen, gelegentlich mit höheren Fe-Gehalten, auf. Der größte Teil des Marmors dürfte direkt bei der Anlage der in den Berg eingeschnittenen Stadtfläche angefallen sein. Daneben wurde aber auch am N- und NE-Hang des Burgbergs in mehreren Brüchen ein qualitativ hochwertiger Marmor abgebaut. Da die Herkunft von Museumsproben des Athenatempels zu bestimmen war (Kapitel 7.11), wurde sowohl anstehendes Probenmaterial aus dem Bereich der Stadtanlage als auch aus den antiken Brüchen untersucht.

Ihr maximales Korngrößenspektrum (Abbildungen in Kapitel 7.11) variiert zwischen 0,6 und 2 mm bei mittleren Korndurchmessern von 0,4-0,67 bzw. senkrecht zur nicht seltenen Kornlängung 0,2-0,4 mm.

Die erfassten Dolomitgehalte reichen von 0 bis zu 17 Gew% bei den dunkleren und stärker ge-

bänderten Partien, die auch höhere Quarzgehalte aufweisen können.

Die Isotopie der Priene-Marmore unterscheidet sie deutlich von der der meisten Marmore am Ostufer des Bafa-Sees, deckt aber ein recht breites Feld ab und überlappt z.B. mit Euromos und dem antiken Bruch gegenüber der Insel Burgass Adasi am NW-Ufer des Bafa-Sees.

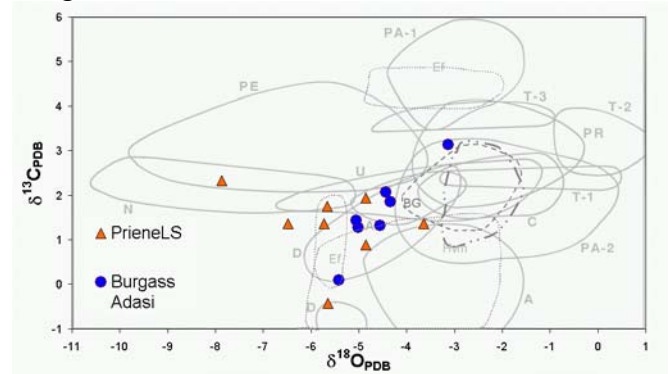


Abbildung 174: Breit streuendes Isotopenfeld der Marmorproben von Priene bei teilweiser Überlappung mit Burgass Adasi

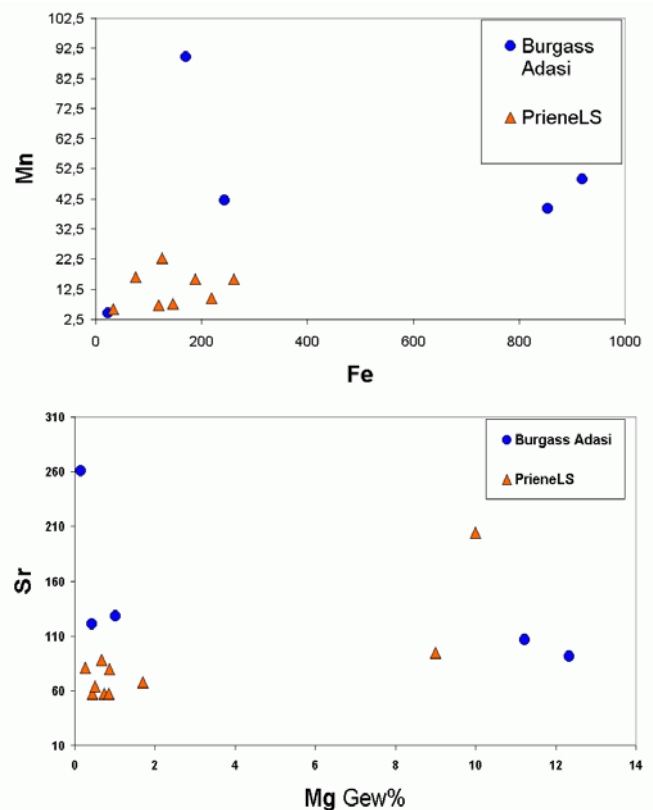


Abbildung 175: Fe/Mn und Mg/Sr-Korrelationsdiagramme von Marmoren aus Priene und dem antiken Steinbruch gegenüber der Insel Burgass Adasi am NW-Ufer des Bafa-Sees

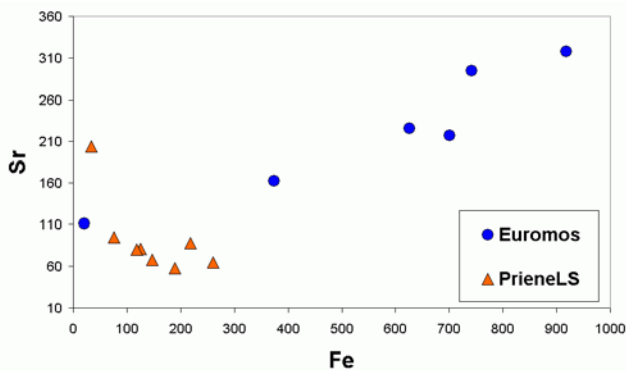


Abbildung 176: Die Euromos-Marmore zeigen bei insgesamt hohen Fe-Sr-Gehalten eine positive Fe/Sr-Korrelation, die reinen Priene-Marmore hingegen eine negative

Eine deutlichere Unterscheidung erlauben die Spurenelementgehalte. Auf einige Merkmale wurde schon beim Vergleich mit den Euromos-Marmoren eingegangen (Fe, Mn, Mg, negative Cer-Anomalie).

In Abbildung 175 und Abbildung 176 ist das vergleichsweise enge Feld von Sr, Fe, Mn und eingeschränkt Mg der Priene-Marmore erkennbar, wobei die dolomitreicheren Proben in das wesentlich uneinheitlichere Feld der teilweise dolomitischen Marmore des antiken Steinbruchs am NW-Ufer des Bafa-Sees gegenüber der Insel Burgass Adasi greifen.

Bemerkenswertweise sind – im Gegensatz zu den meisten anderen Marmoren – Fe und Sr bei den Priene-Marmorproben negativ korreliert.

Während ein früher untersuchtes (GERMANN 1981) gräulich-weiß gemustertes Fragment des Athenatempels petrographisch und geochemisch (Mg 1,2 Gew%, Sr 80, Fe 180, Mn 16 ppm) mit den für Priene-Marmoren ermittelten Merkmalen übereinstimmt, weist die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Probe der Antebasis des Athenatempels vollkommen andere Merkmale auf. Ihr Marmor stammt offensichtlich nicht aus lokalen Quellen, sondern wurde von den Phourni-Inseln (Kapitel 6.5.2) importiert wurde. Deshalb werden in dem Athenatempelabschnitt (Kapitel 7.11) zur Unterscheidung von den Phourni-Marmoren weitere Merkmale der Priene-Marmore beschrieben.

Trotz der insgesamt nicht sehr hohen farblichen Qualität der Priene-Marmore kann eine über lokale Zwecke hinausgehende Verwendung nicht ausgeschlossen werden. Erschwert wird die Festlegung durch ihr breites Eigenschaftsspektrum. So zeigt z.B. die Probe Pri4

(Abbildung 257) eine beträchtliche Übereinstimmung mit den Marmoren des Delphinions von Milet (Kapitel 7.3.2) und dem Wagenrennenfries von Myus (Kapitel 7.4.3), und ihre sichere Abgrenzung von dem Marmor des kleinen Bruchs MyLS28 bei Myus ist zunächst kaum zu leisten. Sie stützt sich vor allem darauf, dass der Priene-Probe Kornlänge und Einregelung fehlt, sie insgesamt etwas feiner- und gleichkörniger ist und einen etwas gräulichen Farbton aufweist, der durch eine gewisse Auflockerung des Kornverbands noch verstärkt wird.

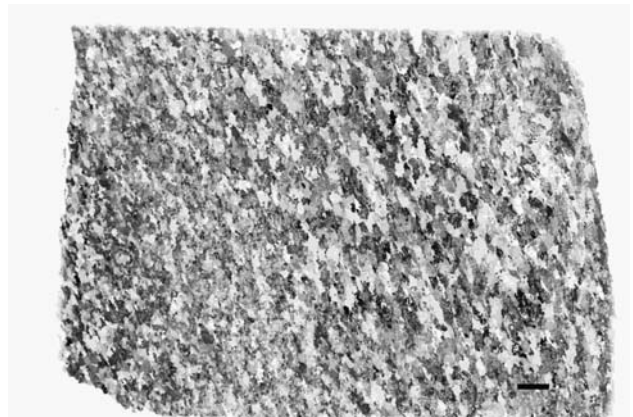


Abbildung 177: Dunkler Marmor mit Lagentextur und Kornlänge (Pri5), N+, Maßstabsbalken 2 mm

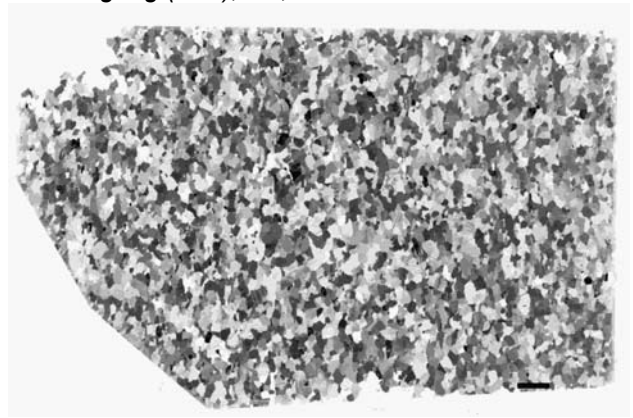


Abbildung 178: Weißer Marmor ohne Kornlänge und erkennbare reliktische Schichtung (Pri1), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Generell weisen die hellen Priene-Marmore ein isometrisches Korngefüge ohne Einregelung auf (z.B. Abbildung 178). Demgegenüber treten bei dunkleren akzessorienreichen (insbesondere glimmerhaltigen) Marmoren ausgeprägte Kornlängen subparallel zu der die Sedimentation nachzeichnenden Lagentextur in den Vordergrund (Abbildung 177). Schon relativ geringe Drücke reichen aus, Kornlängen (bis hin zu Schieferungen) senkrecht zur Druckrichtung zu akzentuieren, die bei den weißeren Marmoren durch die von höheren Temperaturen begünstig-

te Tendenz zu isometrischer Kornspaltung wieder aufgehoben werden.

Möglicherweise ist die beobachtete Kornlänge der feinkörnigen Marmore bei Myus auf ihre größere Nähe zu dem Menderes-Gneiskern zurückzuführen, wo höhere gerichtete Drücke Kornlänge induzierten, und vergleichsweise niedrige Temperaturen nur geringe Kornvergrößerung bewirkten. Angesichts der Schnittlagenabhängigkeit der Beobachtungsmöglichkeit solcher Kornlängen und der nur geringen Probenmengen von den Marmorablässen bei Myus würden sich Gefügeuntersuchungen (neben zusätzlicher Geländeprospektion) anbieten, um abgesichertere Aussagen treffen zu können.

6.4.8 Milas

Im heutigen Milas (siehe Karten Abbildung 16 und 17) weisen nur noch wenige Spuren auf seine bedeutende Stellung in der Antike hin. Relativ schwer zugängliche Marmorvorkommen sind am Höhenzug des Soda Dağ oberhalb der Stadt durch eine Reihe von **antiken Steinbrüchen** erschlossen. Überwiegend feinkörnige, gelegentlich auch grobkörnigere, heteroblastische Marmore kommen hier in weißen, grauweiß gestreiften und von Fe-Oxiden gefärbten (heute mit der Handelsbezeichnung Milas-Gold versehenen) Varietäten vor. Die Größe des Bruchgebiets und die Qualität der abgebauten Marmore deuten auf eine regionale Bedeutung dieser Marmorquelle hin. Die Bezeichnung Milas-Marmor wird seit DÜRR (1975) auch als Synonym für die Marmore der gesamten Marmorhülle am Südrand des Menderes-Massivs verwendet.

Ein weiteres Beispiel für die Vielfalt an Marmoren im Untersuchungsgebiet fand sich in einem nahegelegenen modernen Steinbruch (Abbildung 179), in dem eine als "Milas Bordo" (=Bordeaux) bezeichnete Varietät abgebaut wird, deren rötlicher Farbeindruck durch feinveteilte Hämatitkörner hervorgerufen wird (Abbildung 181). Einzelne aus einem derartigen Marmor gefertigte antike Objekte finden sich im Museum von Milas (Abbildung 180) und am Tempel von Euromos.

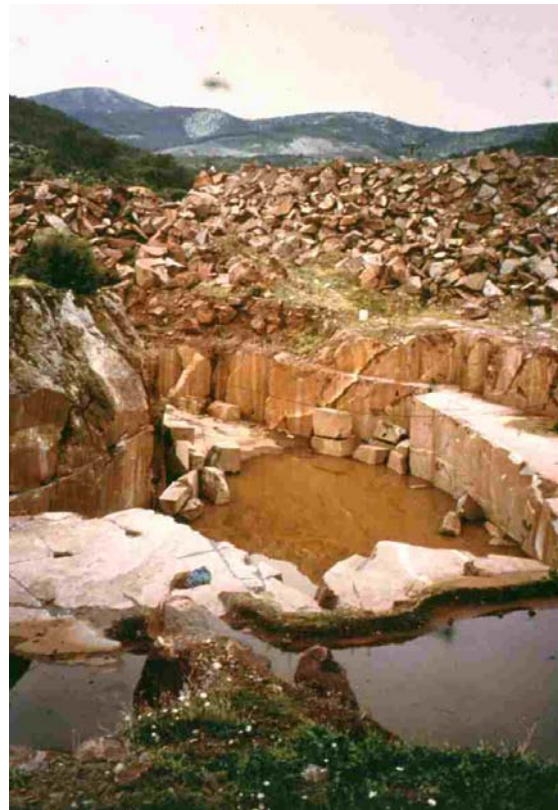


Abbildung 179: Moderner Abbau auf roten Marmor vom Milas Bordo-Typ (bei Kalin Agil)



Abbildung 180: Buntmarmore im Museum von Milas



Abbildung 181: Angeschliffene Platten von Milas-Bordo-Marmor, rechts mit Calcitklufffüllung

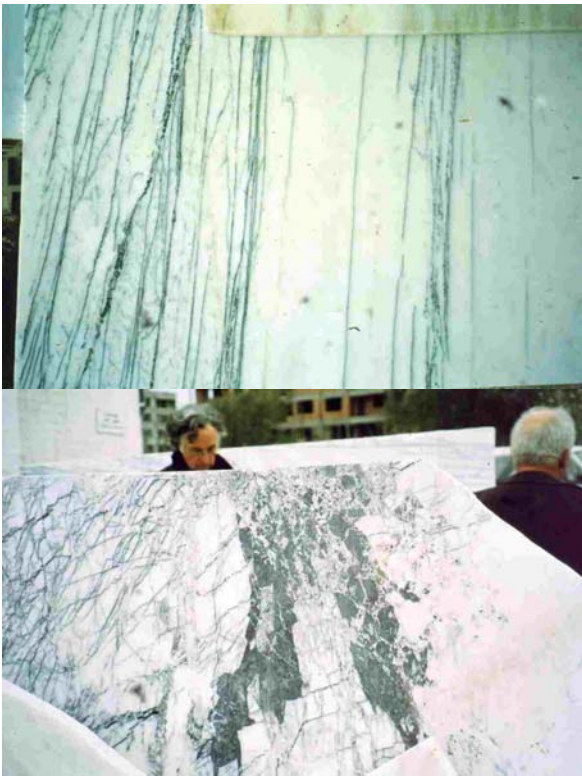


Abbildung 182: Moderne Milas-Marmorplatten mit hohem Anteil akzessorischer Mineralien (in Bergama-Pergamon aufgenommen)

Gerade in den aufgesuchten antiken Brüchen sind beträchtliche Areale mit vorwiegend weißen Marmoren aufgeschlossen. Im gesamten Bruchrevier kommen jedoch auch Marmore mit hohen Gehalten an akzessorischen Mineralien vor, die ihnen eine Mittelstellung zwischen den weißen und Milas-Gold-Varietäten einerseits und den Milas-Bordo-Marmoren andererseits zuweisen, und sich gegenwärtig großer Beliebtheit erfreuen (Abbildung 182). Diese Vielfältigkeit der Milas-Marmore verdeutlicht die Notwendigkeit, ihr Eigenschaftsspektrum wesentlich genauer zu erfassen, als hier nur ansatzweise geleistet werden kann, ein Projekt, das demnächst unter Federführung von Mümtaz Çolak (Universität Izmir) in Angriff genommen wird.

Die Feinkörnigkeit der Milas-Marmore wird in den Dünnschliffaufnahmen (Abbildung 183 - Abbildung 185) deutlich (MGS um 1, gelegentlich bis 2,4 mm, AGS 0,2-0,3 mm). Aber teilweise sind auch grobkörnigere Varianten entstanden, allerdings soweit erkennbar nur mit extrem heterogenen Korngefüge (Abbildung 185).

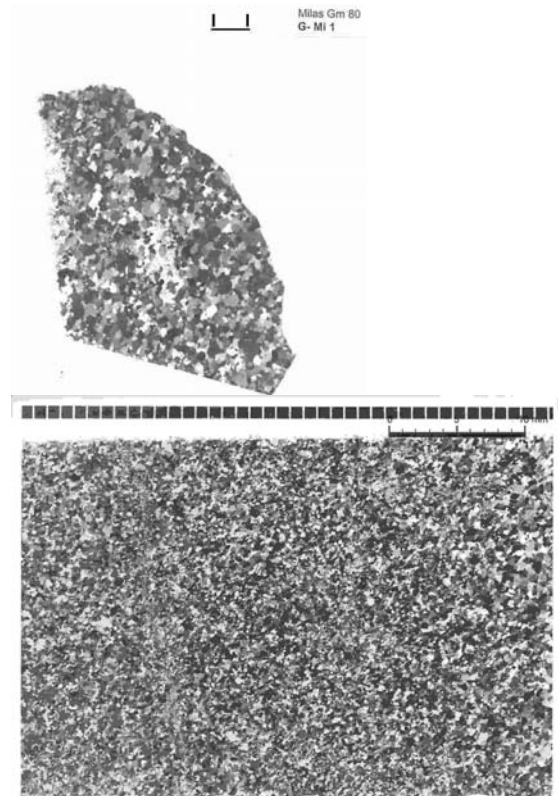


Abbildung 183: Typischer feinkörniger Marmor aus antiken Steinbrüchen von Milas (G-Mi1 und P8), N+, Maßstabsbalken oben 2 mm, unten 10 mm

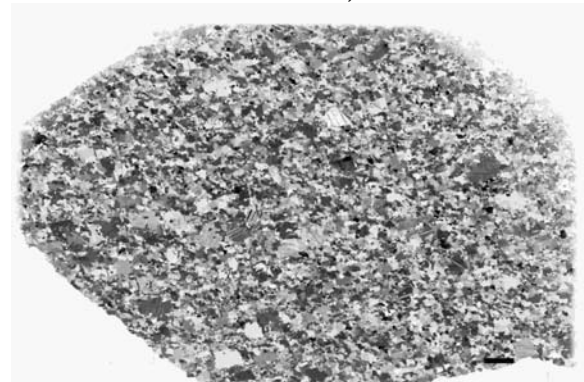


Abbildung 184: Etwas grobkörnigere (MGS 2,4 mm) Variante von Milas-Marmoren (P10-108), N+, Maßstabsbalken 2 mm

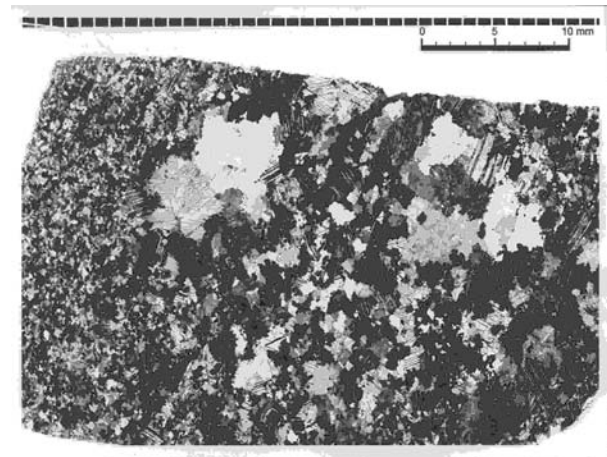


Abbildung 185: Extrem heterogener Marmor mit großen Calcitkristallen (MGS 6 mm) von N-Bruch Milas (P9), N+, Maßstabsbalken 10 mm

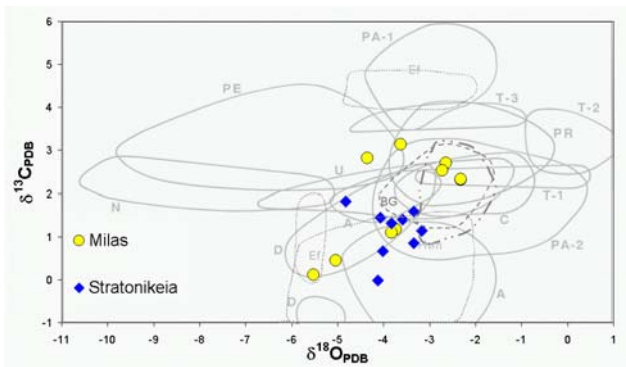


Abbildung 186: Isotopie der Marmore von Milas und Stratonikeia

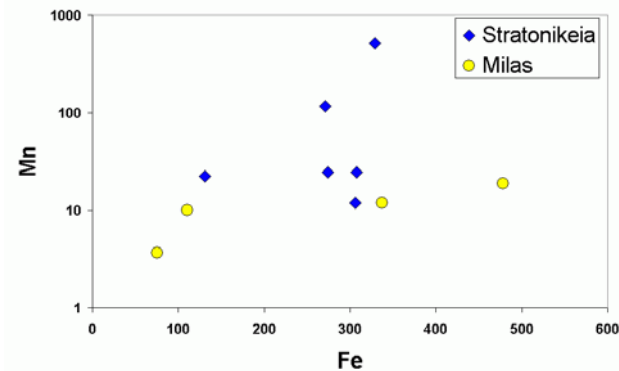


Abbildung 187: Milas-Marmore mit teilweise hohen Fe- und im Vergleich zu Stratonikeia niedrigen Mn-Gehalten

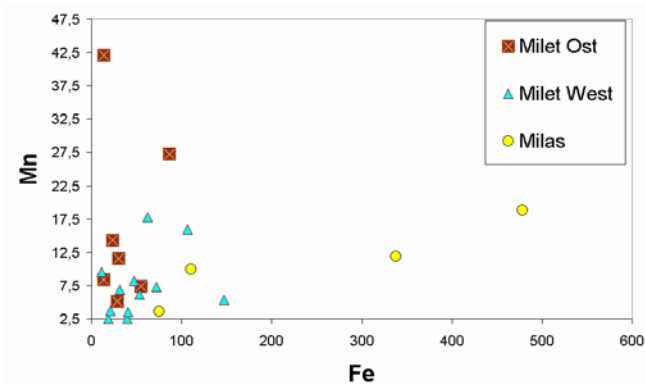


Abbildung 188: Gegenüber den Miletsteinbrüchen am Bafa-See zeigen die Milas-Marmore teilweise erheblich höhere Fe- bei gleichermaßen niedrigen Mn-Gehalten

Isotopisch zeigen die Milas-Marmore eine starke Überlappung mit Feldern ebenfalls feinkörniger Marmore: Dokimeia, Carrara, Hymettos, aber auch z.B. mit denen von Stratonikeia (Abbildung 186). Mit letzteren bestehen auch deutliche geochemische Überschneidungen: hohe Fe-, niedrige Sr- und Mg-Gehalte (Abbildung 187), sowie ähnliche SEE-Verteilungsmuster mit schwacher negativer Cer-Anomalie (Abbildung 189); demgegenüber sind die Mn-Gehalte und das Σ SEE/Y-Verhältnis der Stratonikeia-Marmore höher.

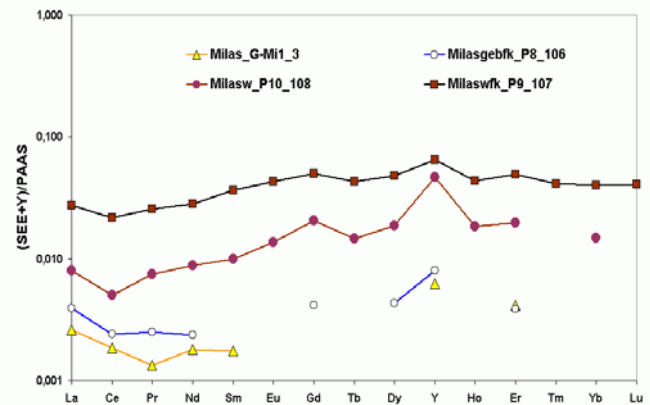


Abbildung 189: Ähnliches SEE-Verteilungsmuster mit nur geringer Cer-Verarmung bei Milas-Marmoren

Eine sichere summarische Abgrenzung zu den Marmoren am Ostufer des Bafa-Sees ist anhand der isotopischen und geochemischen Daten nicht möglich (vgl. die Diagramme dort). Hier ist der sorgfältige Vergleich der individuellen Probencharakteristika unter Einbeziehung petrographischer Merkmale unerlässlich: z.B. vorherrschende Feinkörnigkeit, häufig mit gelblich erscheinenden Fe-Oxid-Flittern (Milas Gold) einhergehende höhere Fe-Gehalte (Abbildung 188), Fehlen dolomitischer Lagen (bei allgemein niedrigen Mg-Gehalten). Dadurch gelang es im Zweifelsfall, alle untersuchten antiken Objekte eindeutig z.B. den milesischen statt den Milas-Brüchen zuzuordnen.

6.4.9 Stratonikeia: Stadt und Steinbrüche

Die Stadt Stratonikeia (siehe Karten Abbildung 16 und 17) wurde von dem seleukidischen König Antiochos I. (281 - 261 v.u.Z.) gegründet und war bis in die späte Kaiserzeit kontinuierlich besiedelt. Gut erhalten sind u. a. Stadtmauer, Theater, Gymnasion, Bouleuterion, Tempel, Stadttor und Wasserreservoir (Abbildung 190).



Abbildung 190: Stratonikeia-Stadt

Obwohl Stratonikeia von der Flächenausdehnung eher eine kleine Stadt war, wurde sie, wie Strabon überliefert, von den Seleukiden bevorzugt und mit prächtigen Bauten aus Marmor geschmückt. Prominentestes Beispiel ist das Gymnasion, das mit seiner Größe von ca. 105 x 180 m und kostbarer Innenausstattung aus weißem Marmor alle anderen kleinasiatischen Beispiele in den Schatten stellt (MERT 1999). Neben dem guten Erhaltungszustand der gesamten Anlage ist u.a. eine in Marmor eingravierte Abschrift des Edikts des Diokletian bemerkenswert (Abbildung 191). Leider ist die nahe Eskihisars gelegene antike Stadt heute durch Braunkohletageabbau gefährdet.

In der Nähe der antiken Stadt Stratonikeia wurden in unwegsamem Gelände zwei aufgelassene Marmorsteinbrüche gefunden, auf die wir dank Hinweisen im Marmorwerk Altıntaş und von Anwohnern stießen, und die in der Literatur bisher nicht beschrieben sind. Im größeren der beiden Steinbrüche (in dem mindestens 18.000 m³ abgebaut wurden) sind noch mehrere Schrotgräben und sonstige Abbauspuren einschließlich liegengelassener Kapitelle und Säulenschafte vorhanden (Abbildung 192).



Abbildung 191: Wandinschrift (Edikt des Diokletian) am Marktplatz von Stratonikeia



Abbildung 192: Antiker Bruch bei Stratonikeia; oben mit erhaltenem Schrotgraben

Der in Abbildung 192 oben abgebildete Schrotgraben mit etwa 0,5 m Tiefe und 40 cm Breite umfaßt einen 2,56x1,04 großen Marmorblock, dessen weiterer Abbau wohl aufgrund zweier subdiagonaler Risse unterblieb. Er gehört einer etwa 70 m langen Bruchwand an, die im Hangenden durch eine von NE nach SW etwa 15° einfallende Chlorit-Granat-Glimmerschieferlage begrenzt wird. Bei einer Höhe von 15 und 12 m (geschätzte nutzbare Mächtigkeit von 10 m) und einer Lateralerstreckung zwischen 30 und 40 m ergibt sich ein Abbauvolumen zwischen 18.000 und 28.000 m³ alleine für diese Abbau-galerie. Hinzu kommen noch eine Reihe von kleineren angrenzenden Brüchen.

Wenige Autominuten entfernt befindet sich westlich von Karalti (GPS N37°17'59,2''/E027°58'17,5'', 447 m üNN) ein weiterer kleinerer Steinbruch mit ähnlichen Marmoren, der zur Piste von einer mächtigen Abschlaghalde

mit zahlreichen liegendebliebenen Kapitellbruchstücken begrenzt wird.

Die Marmore beider Steinbrüche sind fein- bis mittelkörnig (Meßblüten-AGS meist um 0,5 mm bis 0,9 mm) und ähneln aufgrund ihres hohen Anteils an gebändert auftretenden akzessorischen Mineralien (Quarz, Glimmer, Feldspäte, Fe- und Mn-Erzminerale, Graphit) dem Milas-Lilaç-Typ. Die auffälligen Bänderungen verlaufen parallel zu den starken isoklinalen Verfaltungslinien, häufig treten auch unregelmäßige gelbliche Flecken auf. In beträchtlicher Anzahl finden sich Metabauxite.

Sowohl die Ausdehnung beider Brüche als auch die vielen antiken Abbauspuren ließen vermuten, dass zumindest Teile der in Stratonikeia verbauten Marmore von hier stammten. Bei einer Begehung der antiken Stadt und ihres Museums zeigte sich jedoch, dass die hier verwendeten Marmore (abgesehen von einigen römischen Dekorationen) keinerlei Übereinstimmung mit den äußeren Merkmalen der Marmore der von uns aufgefundenen Steinbrüche aufweisen. Erstere sind regelmäßig weiß, ohne erkennbare Muster und wesentlich grobkörniger (Meßblüten-AGS 1-2 mm, MGS >3 mm). Sie ähneln denen von Herakleia, teilweise Aphrodisias und modernen Platten von Muğla und Yatağan; für die beiden letzten Lagerstätten werden MGS zwischen 3-5,8 bzw. 1-5,2 mm angegeben (ZÖLDFÖLDI & SATIR 2002). Die eigenen Proben moderner Platten von Muğla und Yatağan zeigen ebenfalls MGS zwischen 4,2 und 4,6 mm bei AGS um 1 mm in einem sehr heterogenem Gefüge (s. Kapitel 6.4.10). MERT (1999, S. 136) stellt in seiner archäologischen Dissertation zur Baugeschichte Stratonikeias knapp fest: *"Das Material aller Bauteile ist weißer, grobkristalliner Marmor, der aus den lokalen Brüchen der Stadt Stratonikeia stammt"*. Zu diesen verweist er lediglich auf eine Anmerkung bei ASGARI (1977): *"Die Gegend von Yatağan, wo sich auch Stratonikeia bei Eskihisar befindet, ist reich an Marmorbrüchen, die in kleinem Maße auch heute abgebaut werden. Gleich nördlich von Stratonikeia, bei Aladağ, befinden sich antike Brüchen, die ich aber noch nicht untersuchen konnte"* (S. 345, Anm. 37). Einen weiteren Hinweis mit petrographischen Angaben zu Brüchen bei Stratonikeia geben LAZZARINI *et al.* (1980b). Bei diesen handelt es sich aber wahrscheinlich nicht um die von uns aufgefundenen

Brüche, zumal Lorenzo Lazzarini, 2004 auf Thasos hierauf angesprochen, sich über die Unterschiedlichkeit der von uns aufgefundenen Marmore mit den im antiken Stratonikeia verwendeten Werksteinen erstaunt zeigte.

Die Marmore beider von uns aufgefundenen antiken Brüche ähneln dem Milas-Lilaç-Typ. Das dominierende Weiß mit häufigem Grauton wird von grauen bis rötlichen Bänderungen, Schlieren und Flecken unterbrochen. Die Marmore sind feinkörnig (mit MGS um 1-1,6 mm), gelegentlich kommen auch Korngrößen bis 3 mm in einer feinkörnigeren Matrix vor. Nicht selten erfolgt eine Kornlängung parallel zu einer schwach bis mittel ausgeprägten Lagentextur, die in der Regel parallel zu den farbigen Bänderungen verläuft. Dementsprechend können die AGS beider Bereiche innerhalb eines Dünnschliffes zwischen 0,2 und 1 mm schwanken, bei homogener Korngrößenverteilung liegen die AGS i.d.R. um 0,5 mm. Das Korngefüge reicht von homogen bis heterogen. Etwa die Hälfte aller größeren Körner zeigen feine Zwillinglamellenscharen, die Korngrenzen sind eher gerade, gelegentlich auch treppenartig oder buchtig. Hauptmineral der Marmore ist Calcit, jedoch wurde insbesondere bei den rötlichen Marmoren pulverdiffraktometrisch bis zu 12 Gew% feinkörniger Dolomit gemessen. Die gemessenen Quarzgehalte sind gering, überschreiten gelegentlich aber auch 1 Gew%.

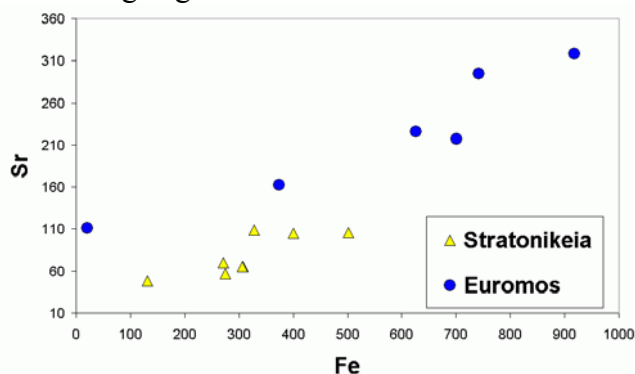


Abbildung 193: Niedrigere Fe- und Sr- Gehalte der Marmore von Stratonikeia gegenüber Euromos

Der höhere Bestand an akzessorischen Mineralien kommt auch in den Elementgehalten zum Ausdruck. Für Mn ergibt sich bei mindestens 11 ppm ein Mittelwert von 42 ppm, mit Maximalgehalten von 517 ppm, dem höchsten gemessenen Mn-Wert überhaupt (s. Abbildung 187). Fe liegt um 300 – 500 ppm, nur bei einer hellwei-

Ben feinkörnigen Probe treten lediglich 130 ppm auf (Mn 11,8, Sr 48 ppm, Mg 0,27 Gew%). Bei niedrigen Sr-Gehalten zwischen 40 und 110 ppm (Abbildung 193) ergeben sich hohe Fe/Sr-Verhältnisse zwischen 3 und 5. Die Fe- und Sr-Gehalte liegen in der Regel jedoch beträchtlich unterhalb von denen der z.B. ebenfalls gebänderten Euromosmarmore und erlauben eine zusätzliche Abgrenzung. Abgesehen von den dolomitischen Partien sind die zwischen 0,16 und 0,3 Gew% liegenden Mg-Gehalte sehr gering. Anders als bei vielen anderen Marmoren liegen die Messwerte von Pb, Th, U und Zr sämtlich oberhalb der Nachweisgrenze.

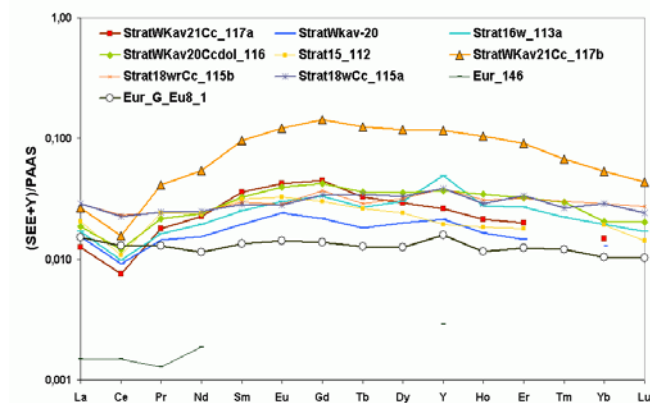


Abbildung 194: Die SEE-Verteilungsmuster der "Stratonikeia"-Marmore weisen bei mäßigem Cer_{neg} eine auffällige Fraktionierung zuungunsten der schweren SEE auf. Der Kurvenverlauf der Euro-mosproben ist demgegenüber flacher

Die SEE (Abbildung 194) weisen bei mittelhohen Gesamtgehalten zwischen 2,4 und 7 ppm ein vergleichbares Verteilungsmuster mit $\Sigma SEE/Y$ von 2,2-6, Cer_{neg} zwischen 0,45 und 0,85 sowie Y/Ho zwischen 53 und 90 auf, Indikatoren eines stärkeren terrestrischen Detritus-eintrags.

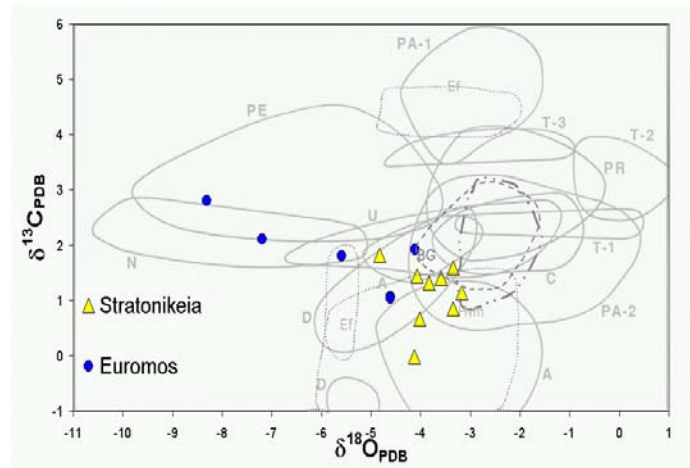


Abbildung 195: Isotopie der Marmore von Stratonikeia und Euromos

Die Sauerstoffisotopie zwischen $-3,2$ und $-4,8$ ist bei einem Ausreißer von $-5,9$ recht eng begrenzt (Abbildung 195 und im Vergleich zu Milas Abbildung 186). Die Proben des Steinbruchs W-Karalti weisen ein schmales δC -Isotopenfeld zwischen 1,1 und 1,6 auf. Demgegenüber reicht die Spannweite der Kohlenstoffisotopie des größeren Steinbruchs von 1,8 bis $-2,4$ (vgl. Abbildung 48). Ob diese ungewöhnliche Verarmung der schweren C-Isotope auf Verwitterungseinflüsse zurückgeht oder lokaltätsinhärent ist, wie z.B. auch bei Aphrodisias oder Afyon-Dokimeia beschrieben, kann nicht entschieden werden. Jedoch zeigt sich für die insgesamt niedrigen δC -Werte eine deutliche negative Korrelation zu den recht hohen Fe/Sr-Verhältnissen zwischen 3 und 5. Leider liegen für die Marmore mit negativer C-Isotopie keine Spurenelementmesswerte vor.

Lässt sich wegen fehlender Probennahmefähigkeit die Herkunft der in Stratonikeia verwendeten Marmore auch nicht feststellen (vermutlich Muğla oder Yatağan), so kann das hier vorgestellte Datenmaterial beider recht großen antiken Steinbrüche dazu beitragen, die Herkunft der Marmore in anderen antiken Stätten – wahrscheinlich der näheren Umgebung – zu bestimmen. Ihre Merkmale unterscheiden sich zumindest deutlich von denen sämtlicher untersuchten Museumsproben.

6.4.10 Muğla - Yatağan

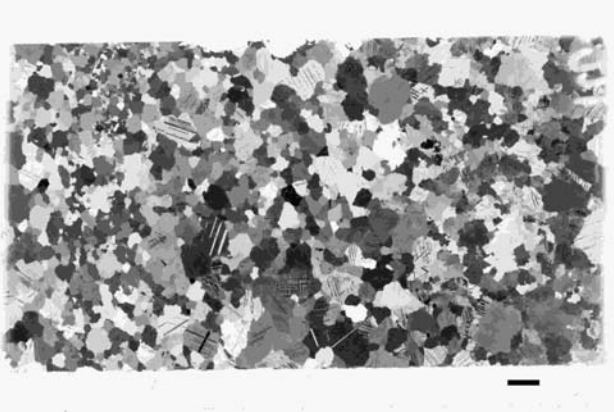


Abbildung 196: Muğla Beyaz-Marmor, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Der höhere Metamorphosegrad im Gebiet um Muğla und Yatağan (s. Abbildung 143) hat grobkörnigere Marmorvarianten hervorgebracht, die in der modernen türkischen Marmorproduktion eine beträchtliche Rolle spielen. Untersuchte Platten aus dieser Produktion („Muğla Beyaz“ = Muğla Weiss“) zeigen ein heterogenes Gefüge mit MGS bis 4,6 mm, das teilweise von feinkörnigeren Lagen durchzogen wird und auch dunkle wolkige Bereiche aufweisen kann. Sie besitzen sehr geringe Spurenelementanteile, fast alle SEE liegen unter der Nachweisgrenze. Eine wohl wegen höherer Fe-Gehalte als Muğla Sari (= gelb) bezeichnete feinkörnigere Variante weist insgesamt höhere Spurenelementgehalte auf (Σ SEE 1 statt 0,1 ppm) und deutet auch einen schwachen Dolomitpeak an.

Die drei Isotopiemesswerte dieser Marmorlagerstätte liegen knapp unterhalb des Bafa-See-Felds eng beieinander.

	Fe ppm	Sr ppm	Mg Gew%	Mn ppm	δO	δC
MuglaBeymod_150	10,3	57	0,02	2,50	- 4,08	1,67
MuglaBeymod_151	12,6	53	0,04	2,50	- 3,92	1,59
MuglaSari148	161,0	94	0,21	6,95	- 3,33	1,17

Tabelle 26: Geochemische Daten von Muğla-Marmoren

Literaturhinweise und der äußere Augenschein lassen annehmen, dass Marmore dieser Art beispielsweise im antiken Stratonikeia verwendet wurden (s. Kapitel 6.4.9).

6.4.11 Aphrodisias



Abbildung 197: Blick auf das römische Theater im antiken Aphrodisias

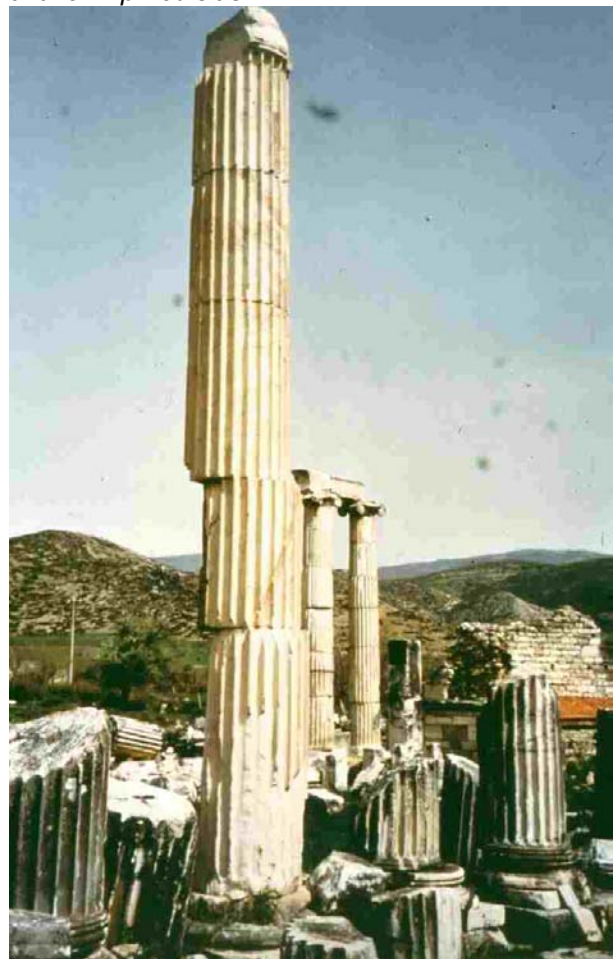


Abbildung 198: Säulen aus hellen und dunklen (untere Fragmente) Marmoren in Aphrodisias

Wie die 30 km weiter östlich gelegenen antiken Marmorlagerstätten von Denizli (s. Abbildung 143) – die nicht aufgesucht werden konnten –, gehören die Marmorbrüche von Aphrodisias zu den östlichsten Ausläufern der Metasedimenthülle am Südrand des Menderes-Massivs (s. Abbildung 16). Mindestens 80 antike Brüche sind auf 4 km² entlang 5 Hügelketten des Baba

Dağ verteilt (PONTI 1996; ROCKWELL 1996). Sie liegen 2 km NE vom antiken Aphrodisias und waren dank ihrer leichten Zugänglichkeit, überdurchschnittlichen Blockgrößen, beträchtlichen Vorräte und guter Qualität maßgeblich für die Entwicklung der antiken Stadt und parallel zu ihr einer berühmten Bildhauerschule. Die Bedeutung des von dieser Werkstatt geprägten Stils für das gesamte römische Reich und die Verbreitung aphrodisischer Marmore bis nach Afrika wurden seit den 1970er Jahren zunehmend besser verstanden (MONNA & PENSABENE 1977; JOUKOWSKY 1986; LAZZARINI *et al.* 2002). Der antike Abbauzeitraum erstreckte sich vom Späthellenismus bis in die Glanzepoche von Byzanz im 5.- 6. Jh. u. Z. (ATTANASIO 2003).



Abbildung 199: Moderner Marmorabbau zwischen Aphrodisias und den antiken Brüchen. Erkennbar ist die Begrenzung des gewinnbaren Volumens durch Dolomiteinschaltungen



Abbildung 200: Abschlaghalden vor antiker Bruchgarie von Aphrodisias

Die Brüche sind noch weitgehend erhalten, da nur gelegentlich moderner Abbau vor den Toren von Geyre oder in der weiteren Umgebung

stattfindet, der häufig durch Fe-haltige, rosagefärbte Dolomitlagen begrenzt wird (Abbildung 199). Überwiegend wurde ein mittel- bis grobkörniger weißer Marmor abgebaut, der aufgrund seiner Homogenität und Festigkeit ideal für die Ausarbeitung auch sehr feingliedriger detailreicher Skulpturen mit Girlanden geeignet ist, einem Kennzeichen der Aphrodisias-Bildhauerschulen. Daneben haben unterdessen auch graue und grau-gebänderte Marmore (s. Säulen in Abbildung 198 unten) mit einem großen Verbreitungsgebiet Aufmerksamkeit gefunden (z.B. TYKOT & HERRMANN JR. 2003).

Vor den in die Gebirgsketten eingeschnittenen Marmorbrüchen mit zahlreichen Schrämspuren⁵⁸ befinden sich große Halden (Abbildung 200) aus kleinformatigen Abschlagfragmenten. Liegendebliebene Kapitelle etc. sind allerdings kaum zu finden, was auf eine optimale Nutzung der Reserven hindeutet. Zunächst nachteilig für eine frühe Verbreitung dürfte der erforderliche Transport über lange Landstrecken gewesen sein. Ähnlich wie bei den Brüchen von Afyon-Dokimeia hat sich das allmählich vor dem Hintergrund des großen Marmorbedarfs in der römischen Kaiserzeit und der Berühmtheit der aus Aphrodisias stammenden Bildhauer geändert, setzte aber ein komplexes Organisationssystem voraus (vgl. RÖDER 1971; FANT 1989).

Dieses heute sehr leicht erreichbare und gut erhaltene Bruchgebiet einschließlich seiner Produkte würde sich für eine exemplarische Untersuchung der geologischen Voraussetzungen für eine optimale Marmorgewinnung in antiker Zeit gut eignen.

⁵⁸ Erwähnenswert ist auch ein möglicherweise von christlichen Zwangsarbeitern in den Marmor eingeritztes Kreuz mit griechischer Inschrift.

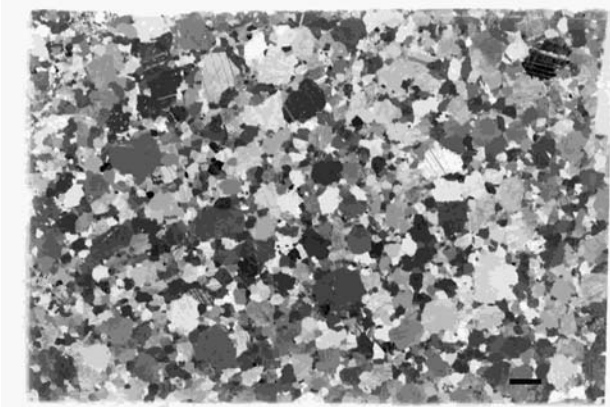


Abbildung 201: Weißer, mittel- bis grobkörniger Aphrodisias-Marmor mit heterogenem Korngefüge (Afr4), N+, Maßstabsbalken 2 mm

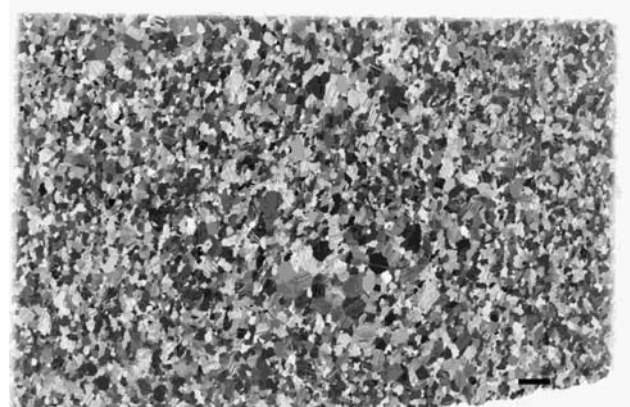


Abbildung 204: Feinkörniger weißgrauer Aphrodisias-Marmor mit nur wenigen Calcitkristallen bis 3 mm MGS (Afr3aCcwgr), N+, Maßstabsbalken 2 mm

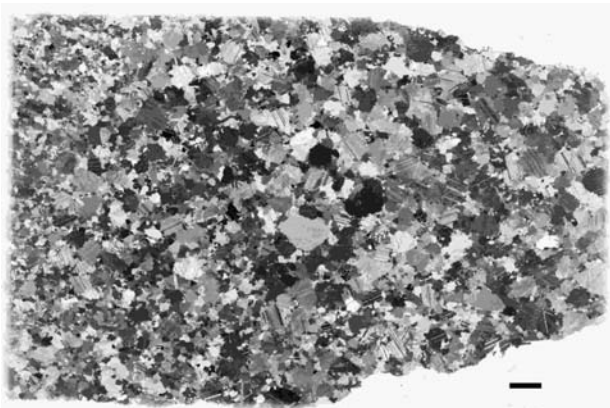


Abbildung 202: Weißer Aphrodisias-Marmor mit homogenem bis heterogenem Korngefüge und 2 unterschiedlichen Bereichen, die sich im Handstück nicht bemerkbar machen (Afr5), N+, Maßstabsbalken 2 mm

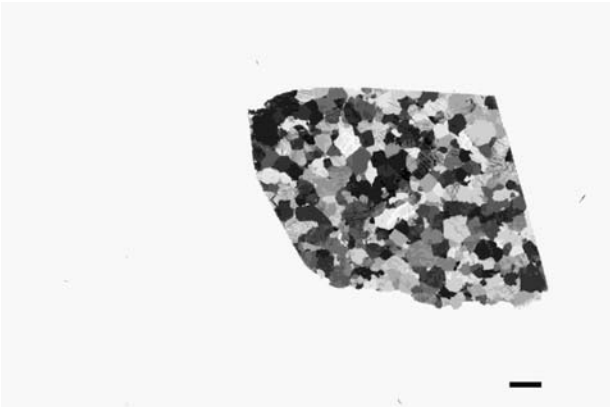


Abbildung 203: Mittelkörniger weißer Aphrodisias-Marmor mit homogenerem Korngefüge (Afr10), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Anders als der äußere Eindruck vermuten lässt, zeigt sich unter dem Mikroskop ein breitgestreutes Gefügespektrum mit sowohl eher homogener als auch deutlich heterogener Korngrößenverteilung bei MGS von 2-4 mm (Abbildung 201 - Abbildung 204).

Jedoch sind meist nur schwach ausgeprägte postmetamorphe Deformationserscheinungen wie gebogene Zwillinglamellen erkennbar, bei kurvigen bis buchtigen Korngrenzen. Die kleineren Körner sind folglich nicht Ergebnis nachträglicher Kornzerkleinerung durch ein wechselndes tektonisches Regime. Vielmehr dürften keine hinreichenden Metamorphosebedingungen für eine gleichmäßige Kornspaltung zu Lasten der kleineren Calcitkristalle bestanden haben, wozu sicherlich auch zahlreiche die Kornspaltung hemmenden akzessorischen Kristallisationskeime beitrugen.

Der Gehalt an akzessorischen Mineralien reicht von niedrig bis außerordentlich hoch. Der oft geringe Anteil an opaken Einschlüssen macht sich auch im weitgehenden Fehlen eines Geruchs nach faulen Eiern beim Aufmahlen bemerkbar. GORGONI *et al.* (2002) und LAZZARINI *et al.* (2002) geben generell höhere Gehalte an Graphit, daneben Quarz und Hellglimmern an, was für die graueren Varianten zutrifft, für die hellweißen nur teilweise. Hier fanden sich neben Quarz und Glimmer auch Plagioklase und Epidot an korrodierten Calciträndern als Hinweis für eine nachträgliche Veränderung des Mineralinhalts durch Fluide.

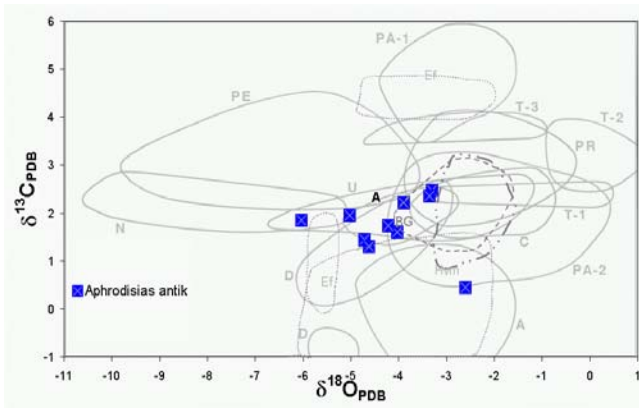


Abbildung 205: Die meisten Isotopiennesswerte liegen in den klassischen Aphrodisias-Feldern

Die Isotopie liegt in Übereinstimmung mit den Daten von HERZ (1987) weitgehend innerhalb der beiden in der Literatur beschriebenen Aphrodisias-Felder (Abbildung 205), wobei das obere stark mit anderen klassischen Marmorlagerstätten überlappt (der δO -Wert bei -6 gehört zu einer dolomitreichen Probe). Beide Felder wurden unterdessen (GORGONI *et al.* 2002) zu einem Feld verschmolzen (δO -2,42 / -4,23, δC -1,43 / +2,55). Die leichten δC -Werte sind insgesamt ein häufiges Charakteristikum von Marmoren der südlichen Menderes-Metasedimenthülle.

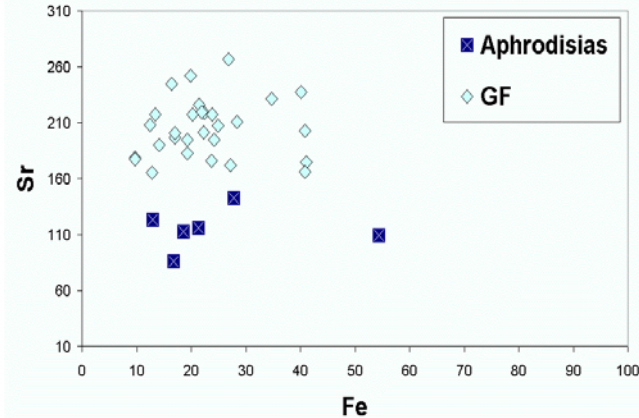


Abbildung 206: Bei niedrigen Fe-Gehalten aphrodisischer und prokonnesischer Marmore unterscheiden sich letztere durch höhere Sr-Gehalte

In den rein weißen antiken Marmorproben treten nur sehr niedrige Gehalte an Spurenelementen auf. Mn (2,5-8 ppm), Fe (13-54 ppm) und Mg (0,12-0,54 Gew%) liegen in der Größenordnung beispielsweise prokonnesischer Marmore. Werden für letztere die Messwerte des Großen Frieses vom Pergamonaltar als Prototyp betrachtet, erlauben lediglich die niedrigeren Sr-Gehalte der Aphrodisias-Marmore eine geochemische Diskriminierung (Abbildung 206).

Die gemessenen geringen Spurenelementgehalte sowie die MGS decken sich mit Literaturangaben zu Aphrodisias-Marmoren (MOENS *et al.* 1992; ATTANASIO 2003). Wesentlich häufiger als z.B. bei den prokonnesischen Marmoren beobachtet, zeigen jedoch schon leicht grau gebänderte Partien aus Aphrodisias eine beträchtliche Zunahme an Fe (400-1500 ppm), Mn (41-90 ppm) und auch Sr (210-326 ppm); nur bei einem dolomitreichen Fragment lag Mg mit 9 Gew% dabei deutlich über dem Höchstwert von 0,56 Gew% aller sonstigen Proben.

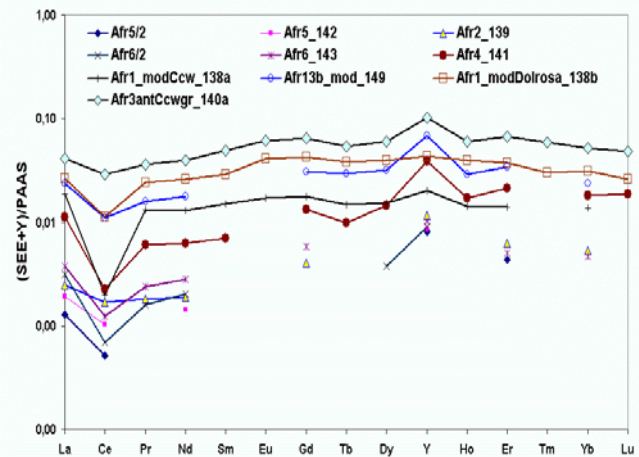


Abbildung 207: Unregelmäßiges SEE-Verteilungsmuster der Aphrodisiasmarmore mit gelegentlichen Ce- und Y-Peaks bei insgesamt flachem Kurvenverlauf und niedrigen Gehalten

Die Gehalte an SEE (Abbildung 207) sind durchweg beträchtlich niedriger als bei vielen anderen weißen Marmoren und liegen oft unterhalb der Nachweisgrenze, ihr Verteilungsmuster ist zugleich unregelmäßig und i.d.R. nicht zur kollektiven Unterscheidung von anderen Marmorlagerstätten geeignet. Das weite Merkmalspektrum der untersuchten Aphrodisiasmarmore ist auch dafür verantwortlich, dass die Diskriminanzanalyse (Kapitel 5.3) bei dieser antiken Lagerstätte die meisten Fehlzuordnungen ergab.

Dank der erst relativ spät einsetzenden überregionalen Verbreitung der Aphrodisias-Marmore kam ihre Verwendung für die untersuchten Museumsobjekte kaum in Frage. Trotz der allgemein starken Überlappung mit Einzelmerkmalen der südlichen Menderes-Marmore konnte aber durch sorgfältigen Vergleich der petrographischen, geochemischen und isotopischen Merkmale durchweg eine kohärente Zuordnung zu anderen Marmorlagerstätten erfolgen.

6.4.12 Afyon-Dokimeia

Geologisch gehören die Marmore der Lagerstätten von Afyon und Uşak nicht mehr zum Menderesgebiet, sondern zur nördlich gelegenen Afyon-Bolkardağ-Zone (s. Abbildung 16 und tektonische Karte Abbildung 139); die Marmore von Afyon werden aber hier trotzdem abschließend besprochen. Sie sind mesozoischen Alters und weisen generell einen geringeren Metamorphosegrad auf (Grünschieferfazies), weshalb sie strukturell als über dem Menderes-Massiv liegend eingeordnet werden (zum weiteren geologischen Rahmen vgl. auch WIJKERSLOOTH 1944; ARIKAN 1963; SCHUETT & KAVUSAN 1994; TOLLUOGLU *et al.* 1997; TOLLUOGLU & SUMER 1997).

Die antiken Brüche von Dokimeion oder Docimium liegen etwa 20 km NE von Afyon bei Iscehisar inmitten eines der neben Prokonnesos aktivsten Marmorabbauereviere der modernen Türkei (s. topographische Karte Abbildung 16). Ihre als phrygische, dokimeische oder synnadi-sche Marmore bezeichneten Produkte gehörten zu den begehrtesten Marmoren im Römischen Reich, die selbst im heutigen Rumänien nachweisbar sind (MÜLLER *et al.* 1996).

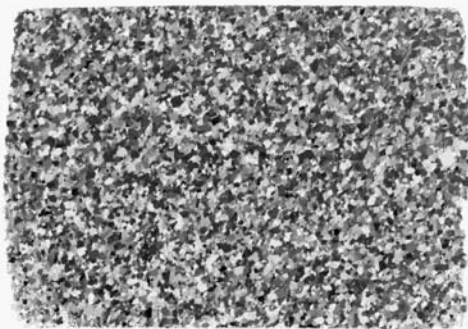


Abbildung 208: „Afyon Sardikli“, N+, Maßstabsbalken 2 mm

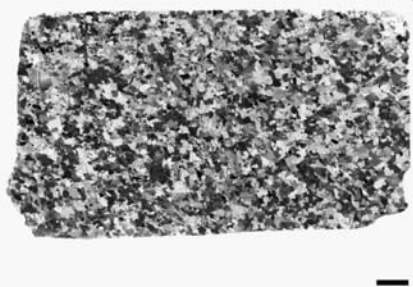


Abbildung 209: „Afyon White“, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Dank des hohen Organisationsaufwands liegt sehr viel schriftliches Material aus römischer

Zeit über sie vor und erlaubte in Verbindung mit dem exzellenten Erhaltungszustand vieler Brüche detaillierte Einblicke in die komplexen Marmorgewinnungs- und weiterverarbeitungsverfahren. Sie erregten seit ihrer Wiederentdeckung (TEXIER 1839) schon früh die Aufmerksamkeit von Forschungsreisenden (z.B. HAMILTON 1842, ab S. 456). Die noch immer ausführlichste Beschreibung mit weit über die Brüche hinausgehenden Feststellungen stammt von RÖDER (1971). Am bekanntesten und begehrtesten waren die als *Pavonazetto* bezeichneten farbigen Marmore. Sie bedienten den römischen Geschmack für Buntmarmore seit Augustus vortrefflich und waren nicht zuletzt wegen des langen Landweges von 300 km bis zur ägäischen Küste (ab Apamea (heute Dinar) über den Mäander (RÖDER 1971)) mit 240 Drachmen je Kubikfuß die teuersten im Edikt des Diokletian aufgeführten Marmore (RÖDER 1971).

Daneben gab und gibt es auch weiße Varianten, die heute als Beyaz, Şeker oder Sari bezeichnet werden. Oft sind sie von gelben Bänderungen durchzogen und enthalten nicht selten brekziöses Material.

Leider konnten wir diese wichtige Lagerstätte (ARIKAN 1963) nicht aufsuchen und erhielten auch erst nach Abschluss der geochemischen Analysen Material von modernen Abbauen. Die beiden Dünnschliffaufnahmen (Abbildung 208 und Abbildung 209) zeigen jedoch deutlich das hervorstechendste Merkmal all dieser schwach grünschieferfaziellen Marmore: ihre Feinkörnigkeit in einem recht homogenen Gefüge. Die in der Literatur (MOENS *et al.* 1987; JONGSTE *et al.* 1995) angegebenen teilweise hohen Elementgehalte (Minimum/ Mittelwert/ Maximum) an Fe (7,3/59/256) und Mn (5,5/34/118) sowie von Sr (52/108/138) bei lediglich Spuren von Dolomit lassen eine Verwechslung mit ebenfalls niedriggradig metamorphen und akzessorienreichen Menderes-Marmoren (z.B. Stratonikeia) als denkbar erscheinen. Für die Isotopie werden δC -1,5 bis +2,8 und δO -7,5 bis -3 (GORGONI *et al.* 2002) bzw. δC -1 bis +3 und δO -9 bis -3 (JONGSTE *et al.* 1995) angegeben. Sie greift damit weit in das Hauptfeld der meisten, auch feinkörnigen, klassischen Marmore hinein und überlappt z.B. fast vollständig mit der Isotopie der Euromos-, Stratonikeia- oder Milas-Marmore (vgl. Feld D in Abbildung 43).

6.5 Marmorlagerstätten des Attisch-Kykladischen Komplexes

Abgesehen von Thasos gehören die wichtigsten Marmorlagerstätten des klassischen Griechenlands (Paros, Naxos, Pentelikon, Hymettos) zu dieser weitreichenden geologischen Einheit im Ägäisraum (s. Abbildung 16 und Abbildung 17 auf S. 51 sowie die tektonische Karte in Abbildung 139). Wie schon ausgeführt, werden auch einige früher der Menderes-Marmorhülle zugeordnete Lagerstätten (z.B. Ephesos, Magnesia, Phourni) unterdessen als Teil des Kykladischen Komplexes betrachtet, u.a. weil in deren Umgebung Hochdruck-Mineralisationen auftreten. Zudem zeigen viele ihrer Marmore höhere δC -Werte als die klassischen Menderes-Äquivalente.

Nicht hier beschrieben werden weiße Marmore, die in der Antike auch auf Anaphe, Tenos und Andros abgebaut worden sein sollen (BLÜMNER 1875). Gleiches gilt für das Lauriongebirge, aus dessen Marmoren der Athenatempel am Cap Sunion errichtet worden ist, und viele andere Vorkommen ohne erkennbaren direkten Bezug zum unmittelbaren Projektgebiet. Summarisch der Vollständigkeit halber aufgezählt handelt es sich hierbei um auch über den Attisch-Kykladischen Komplex hinausreichende Lagerstätten, oft mit dunklen Kalksteinen, Buntmarmoren und Serpentiniten assoziiert (u.a. nach STAVROPODIS 1977): Euböa (Karystos und Eretria), Skyros, Kavala (Philippi), Rhodos (Lardianische Marmore), Chios, sowie peloponnesische Vorkommen (Doliana, Vresthena, Mani („Rosso antico“ und Mezapos), Tainaros und den Andesit von Krokeai).

Eine genauere Beschreibung und Diskussion von Marmoragerstätten nördlich von Magnesia/Mäander erfolgt im Kapitel 7.6 bei der Behandlung des Artemisions von Magnesia.

6.5.1 Ephesos

6.5.1.1 Geologische Situation

Die Hüllschichten bei Ephesos – Selçuk wurden u.a. von ERDOGAN & GÜNGÖR (1992), CANDAN *et al.* (1999) und GESSNER (2000) geowissenschaftlich untersucht. Die meisten Angaben zur geologischen Situation der Ephesos-Selçuk-Region sind jedoch GÜNGÖR & ERDOGAN

(2002) entnommen. In diesem Gebiet ist die gesamte Stratigraphie des oberen Teils des Menderes Massivs (GÜNGÖR & ERDOGAN 2002) bzw. des nordöstlichen Teils des Kykladischen Komplexes (OKAY 2001) aufgeschlossen. Die metasedimentäre Sequenz weist eine Mächtigkeit von etwa 4 km auf (Abbildung 210).

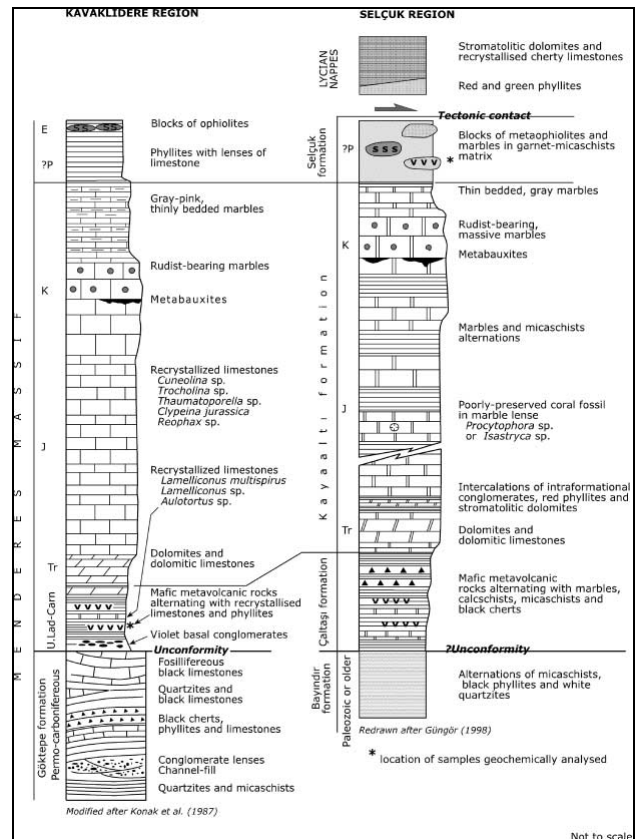


Abbildung 210: Stratigraphisches Profil des Mesozoikums in der Nähe von Milas(I.) und bei Selçuk (GÜNGÖR & ERDOGAN 2002)

Quarzite, Glimmerschiefer und Phyllite mit gelegentlichen Einschaltungen dunkler Marmore bilden die unterste, paläozoische Einheit. Die mesozoische Plattform beginnt mit Glimmerschiefern, in die u.a. vulkanische Gesteine, Kalkschiefer und Marmore eingeschaltet sind. Dünne verkieselte Lagen deuten auf einen tieferen marinen Ablagerungsraum der Çaltaşı-Formation hin, in den sporadische submarine vulkanische Ausbrüche mafische Tuffe eingetragen haben. Die Kayaalti-Formation wird von Plattformkarbonaten gebildet. Ihre unterste Einheit besteht aus gutgeschichteten gelben und braunen Marmoren mit dünnen Glimmerschieferlinsen. Sie gehen nach oben in graue und gelbe dolomitische Marmore mit welligen dolomitischen Lagen über, die als ursprüngliche stroma-

tolithische Dolomithorizonte interpretiert werden können, wie sie auch am Südostufer des Bafasees (bes. „Milet Ost“) zu finden sind. Im mittleren Teil der dolomitischen Kalksteine befindet sich eine detritusreiche Schicht roter und purpurner Phyllite, stromatolithischer Dolomite und Metakonglomerate, die von ERDOĞAN & GÜNGÖR (1992) als Çömlekçi Member bezeichnet wurden. Der mittlere Teil der Kayaalti-Formation enthält 50–60 m mächtige und 200–300 m lange Marmorlinsen im Wechsel mit Kalkschiefern. Die Marmore sind stark rekristallisiert, aber trotzdem wurden im Inneren einer Marmorlinse fossile Korallen (*Isastri-ca* sp. oder *Procytophora* sp.) gefunden, was auf triassisches bis jurassisches Alter hinweist. Die massiven bräunlichen Kerne der Marmorlinsen deuten auf Riffkalkprotolithen hin. Den oberen Abschluss der Kayaalti-Formation bilden korundführende Marmore, wie sie in der Milas-Marmor-Formation des Menderes Massivs, aber auch auf den Kykladen häufig anzutreffen sind. Die Korundführung lässt auf höhergradige Metamorphose schließen, der in Karstsystemen angereicherte Bauxite ausgesetzt waren. Gelegentliche Rudistenspuren lassen als Sedimentationszeitraum der Kalke die obere Kreide (Santonian–Campanian) vermuten.

nat-Glimmerschiefern gebildete, bis 300 m mächtige Selçuk-Formation, in die Blöcke von ophiolithischen Gesteinen und korundführenden Marmoren eingeschaltet sind. Lokal treten auch dünne Marmorlinsen in einer feinkörnigen Matrix aus Quarz-Albit- oder Granat-Glimmerschiefern auf. Die detritische Matrix der Selçuk-Formation wird von dunkelgrünen mafischen Vulkangesteinen durchschlagen, die heute Amphibol, Albit und Chlorit enthalten. Die Ophiolithblöcke treten als Metaserpentinite und Metagabbros auf. Als Zeitraum für diesen Abschnitt schneller Wechsel von Aufschiebungen, mariner Transgression und Ablagerungen wird aufgrund der stratigraphischen Position Obere Kreide bis Unteres Tertiär (Paläozän) angenommen. Der Kontakt zwischen der Selçuk-Formation und der darunterliegenden Kayaalti-Karbonatplattform wechselt im gesamten Gebiet zwischen diskonform und ungestört. In dem Marmorabbaugebiet zwischen Tire and Selçuk tritt jedoch eine Abtragungsgrenze auf (s. Abbildung 211).

Bemerkenswert ist auch, dass in der südlichen Region zwischen Selçuk und Söke Schollen der Lykischen Decken auftreten (BARGU & TURGUT 1997). Sie bestehen aus nichtmetamorphen karbonatischen Sequenzen, meist Kalksteine und Dolomite, und wurden erst nach der Menderes-Hauptmetamorphose als nördlichste Repräsentanten der Lykischen Decken aufgeschoben (GÜNGÖR & ERDOĞAN 2001). Möglicherweise gehören die nur schwach metamorphen Marmore von Çamlık sowie die grauen Kalksteine der Siebenschläfer-Höhle⁵⁹, von denen Probenmaterial entnommen wurde, schon dieser Einheit an.

6.5.1.2 Werksteine im antiken Ephesos

Das antike Ephesos, 3 km westlich vom heutigen Selçuk gelegen, besaß einen eigenen – heute verlandeten – Hafen am Meer (Abbildung 212), und war über den Kaystros, den Küçük Menderes, an das Hinterland und seine Steinbrüche angeschlossen.

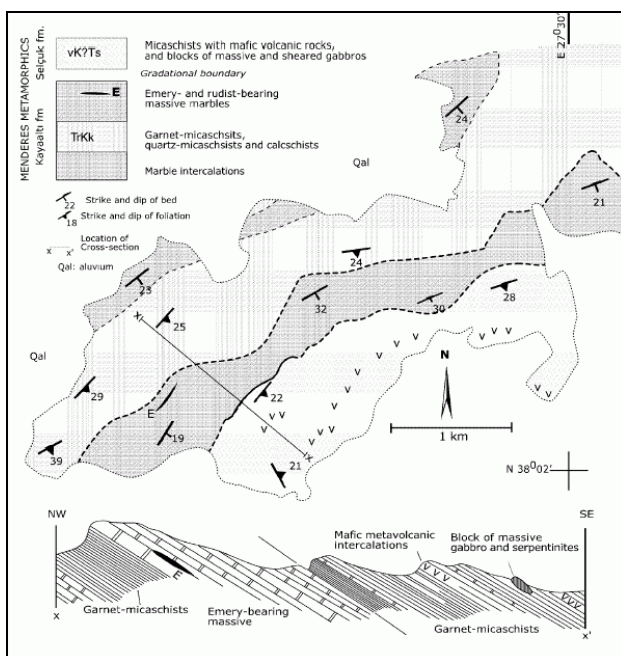


Abbildung 211: Geologische Karte und Schnitt nord-östlich von Selçuk (GÜNGÖR & ERDOĞAN 2002)

Aufliegende dünne pelagische sowie verkieselte Kalksteine deuten auf ein tieferes marines Ablagerungsregime hin. Ihnen folgt die aus Gra-

⁵⁹ Der christlichen Mythologie zufolge versteckten sich hier 251 u.Z. sieben junge Männer vor einer Christenverfolgung und wurden bei lebendigem Leib eingemauert. Sie schliefen fast 200 Jahre lang, bis sie am 27. Juni 446 (dem Siebenschläfertag) wieder aufgeweckt wurden.



Abbildung 212: Blick auf Theater über die „Marmorstraße“ zum ehemaligen Hafen von Ephesos

Dank der geologischen Situation verfügten die ephesischen Bauherren von Anfang an über eine breite Palette an nutzbaren lokalen Werksteinen; neben Marmoren mit und ohne Dolomitlagen auch solche mit einem hohem Anteil an akzessorischen Mineralien in verschiedenen Farben. Dem Schnitt in Abbildung 211 zufolge liegen die Gesteinshorizonte weitgehend ungestört aufeinander, und ihr nicht allzu steiler Einfallswinkel machte größere nutzbare Bereiche zugänglich. Zugleich handelt es sich aber nicht um ein einheitliches großes Bruchgebiet wie etwa auf Marmara, sondern um begrenzte Areale. Da Marmore zudem in mehreren Horizonten mit unterschiedlicher Geschichte vertreten sind, teils als Bänke, teils als linsenförmige Körper, wird sowohl die Vielfalt an Merkmalen verständlich, die die ephesischen Marmore auszeichnet, als auch die große Zahl an Brüchen, von denen bisher etwa 40 Abbaustellen bekannt sind. Die relativ geringe tektonische Überprägung des Gebietes ist ursächlich für das meist gleichkörnige Gefüge der Marmore bei nur schwach ausgeprägten Deformationserscheinungen. Neben reinen Calcitmarmoren kommen häufig dolomitreiche Marmore vor; oft durchsetzen dolomitische Lagen oder Linsen die Cal-

citmarmor matrix. Weitere akzessorische Mineralien treten häufig auf. Im Bereich der Johannesbasilika wurden besonders viele verschiedene Marmore eingesetzt. Ein Teil der Säulen dort zeigt Einschlüsse serpentinitischer Fragmente.

Andererseits wurden die Dekorgesteine im römischen so genannten Marmorsaal von Ephesos anhand des Vergleichs mit Abbildungskatalogen (MIELSCH 1985; GNOLI 1997; PENSABENE *et al.* 1998) folgenden Lagerstätten zugeordnet: „Aus Griechenland stammen Cipollino verde, Rosso antico und Porfido verde di Grecia; aus Kleinasien stammen weißer Marmor lokaler Provenienz und aus Aphrodisias, Pavonazzetto, Breccia corallina, Bigio antico, Rosso brecciato und Alabastro fiorito; aus Ägypten stammt Porfido rosso und aus Nordafrika stammen Nero antico und Giallo antico.“ (KOLLER 2000).



Abbildung 213: Blick von Hafen über die "Marmorstraße" zum Theater



Abbildung 214: Verwendung anstehenden Gesteins im antiken Ephesos

Vor der intensiven Nutzung von Marmor in Ephesos sollen zunächst mergelige Kalksteine von küstennahen Brüchen bei Igdelitepe einge-

führt und verwendet worden sein⁶⁰ (BAMMER 2000; MUSS *et al.* 2003). Daneben kamen ein Grünschiefer von Abuhayattepe sowie andere grüne und braune Schiefer zum Einsatz. Nach der von Vitruv überlieferten Legende begann die Marmorverwendung mit der Entdeckung der Brüche von Belevi durch den Schafhirten Pyxodaros im 6. Jh. v.u.Z. Aus den dortigen Marmoren wurde das Artemision I errichtet, eines der ältesten Marmorbauwerke überhaupt. Für Architekturteile fanden hauptsächlich lokale Marmore (und anstehende Gesteine, s. Abbildung 214) Verwendung, demgegenüber seien für Skulpturen Marmore aus Aphrodisias oder Dokimeion eingeführt worden (KOLLER *et al.* 2003).

Die Ausgrabungen und begleitenden wissenschaftlichen Forschungen in Ephesos finden unter Leitung des Österreichischen Archäologischen Instituts statt. Seit 1998 werden die verwendeten Gesteine und Marmorsteinbrüche in einem interdisziplinärem Projekt systematisch untersucht (KOLLER 2003; KOLLER *et al.* 2003; MUSS *et al.* 2003). Insbesondere dann, wenn die Herkunftsbestimmung der Marmore nicht alleine auf Isotopenanalysen beruht, werden die – leider noch nicht veröffentlichten – Ergebnisse Schlüsse weit über Ephesos hinaus zulassen. Zwar kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit dem gesamten Fragenkomplex einschließlich der im geologischen Rahmen denkbaren Verwendung lokaler Gesteine (Kalksteine und „Buntmarmore“ einschließlich solcher mit ophiolithischen Komponenten) nicht nachgegangen werden.

Jedoch hat sich gezeigt, dass auch in Pergamon beträchtliche Mengen an Marmor aus den ephesischen Brüchen verwendet worden sein müssen (s. Kapitel 7.7). Für den Dionysostempel (Kapitel 7.7.7) konnte dies auf multivariater Basis (Petrographie, Isotopie und Geochemie) nachgewiesen werden, bei vielen anderen Architekturteilen in Pergamon lassen äußere Merkmale diesen Schluss zu. Auch der politische Einfluss der pergamenischen Herrscher auf das Geschick von Ephesos unterstützt diese Annahme. Umgekehrt sollen für die Säulen entlang der „Marmorstraße“ (s. Abbildung 213) von Ephesos große Mengen an granitischem *marmo misio*

aus dem Kozak bei Pergamon verwendet worden sein (GALETTI *et al.* 1992).

ATTANASIO (2003) schreibt – ohne Angabe der Quelle, aber wahrscheinlich auf Vitruv zurückgehend (s. Ende von Kapitel 6.1) –, dass für das Artemision von Ephesos prokonnesischer Marmor verwendet worden sei. Jedoch fand sich in der neueren Literatur hierfür keine analytische Bestätigung. Demgegenüber zeigt unsere Untersuchung eines Kapitellfragments der Hafenthermen (1. Hälfte des 2. Jhs. u.Z.), dass darin tatsächlich prokonnesischer Marmor als Baumaterial diente (s. Kapitel 7.9).

6.5.1.3 Marmorsteinbrüche bei Ephesos und ihre Merkmale

Von den ca. 40 Steinbrüchen bei Ephesos konnte während eines zweitägigen Aufenthalts im März 2000 nur von wenigen Probenmaterial entnommen und anschließend analysiert werden, zumal damals deren beträchtliche Bedeutung für Pergamon noch nicht absehbar war.

Wesentliche Lagerstätten- und petrographische Merkmale wurden oben bereits beschrieben: kleinere Bruchareale mit geringer tektonischer Überprägung, infolgedessen homogene äquigranulare Korngefüge ohne deutliche Anzeichen postmetamorpher Deformation, oftmals dolomitische Lagen sowie Einschlüsse akzessorischer Mineralien.

Am eindruckvollsten ist der untertägige Abbau von **Kuşini**, der sich auf einer Bergkuppe des Kurt Kaya in über 435 m Höhe (520 m nach unserem Höhenmesser) befindet und wohl auch deshalb vor modernem Abbau geschützt blieb (Abbildung 215). Er wurde bereits von ATALEY (1976; 1985) beschrieben, der ein Abbauvolumen von 7000 m³ schätzt. Mehrere stehengelassene Pfeiler stützen die Decke der untertägigen Kammer ab (Abbildung 216), die bei einer sich ins Kammerinnere von 10 auf 4,5 m verjüngenden Abbauhöhe und einer Längserstreckung von etwa 70 m teilweise über 45 m tief in die Marmorbank eingehauen wurde. Bei einem Gesamtvolumen von $70 \cdot 30 \cdot 10 \text{ m}^3 = 21.000 \text{ m}^3$ und der Annahme eines nutzbaren Abbauvolumens von einem Drittel erweist sich die Angabe Ataleys als realistisch. Eine Kluftschar verläuft NE-SW, eine zweite NW-SE. Die ungestörte Bänderung der aufliegenden schiefrigen Metakarbonatsedimente (s. Abbildung 215) setzt sich

⁶⁰ Eine Kopie des Aufsatzes von A. Bammer wurde freundlicherweise von Ulrike Muss zugeschickt.



Abbildung 215: Untertägiger Steinbruch von Kuşini bei Ephesos



Abbildung 216: Stützpfeiler im Untertageabbau von Kuşini



Abbildung 217: Sarkophagrohling in Brüchen von Ephesos Aytekin

in eine parallele Bänderung im 2-cm-Abstand der an das Hangende angrenzenden Marmor-schichten fort, die dadurch ein wellenkalkähnliches plattiges Aussehen annehmen, das sich – soweit erkennbar – in das Marmorpaket nur andeutungsweise fortsetzt.

Die Proben bestehen allerdings nicht aus großkristallinem Marmor, wie Ataley (1976) schreibt, sondern weisen MGS um 2 mm auf (Abbildung 218 d). ATTANASIO (2003) gibt bei 18 Proben MGS von 1,3-2,1 mm an. Der Transport der abgebauten Blöcke in das nahe SW-gelegene Ephesos ließ sich hangabwärts relativ leicht bewerkstelligen.

Ähnliche Korndurchmesser bei allerdings deutlich homogenerem Korngefüge mit geraden Korngrenzen weisen die Marmore von **Aytekin** (Aytekin Kentli Çiftliği nach Angaben unseres türkischen Führers) auf, in deren Brüchen auch antike Artefaktrohlinge liegengeblieben sind (Abbildung 217). Sie liegen zwischen den von uns nicht beprobten Belevi-Brüchen (aus deren Marmor das Artemision I errichtet wurde) und Sağlık auf der NE-Seite des sich küstenparallel erstreckenden Taleinschnittes. Aus ihnen soll der Marmor des Artemision II stammen, offensichtlich wurde Material von hier auch in Pergamon (Dionysostempel) verwendet, weshalb ihre Merkmale im dortigen Kapitel 7.7.13 detaillierter besprochen werden. Vor den beiden übereinanderliegenden Steinbruchgalerien sind geschichtete Abschlagshalden deponiert. Ein Sarkophagrohling (Abbildung 217) mißt $2,3 \times 1 \times 0,6 \text{ m}^3$. Das überschlägig ermittelte Abbauvolumen des 1. Bruchs liegt zwischen 12.000 und 32.000 m^3 , was bei konservativ geschätzten 20% nutzbaren Gesteins von 20.000 m^3 mittlerem Abbauvolumen 4000 m^3 in antiken Objekten verbauten Marmor ergeben würde. Auffällig in dem weißen, mittelkörnigem Marmor mit homogenen Kristallgefüge sind Partien, die entweder deutlich akzentuierte helle oder dunkle schwarzbläuliche Flecken und Schlieren enthalten.

Eine grobkörnigere homogene Marmorvariante (Abbildung 218 c) findet sich zwischen Belevi und dem 15 km westlich von Tire gelegenen Kurşak (long. $27^{\circ}35'$, lat. $38^{\circ}03'$) am N-Hang einer Hügelkette, in deren Umgebung auch höhere Metamorphosegrade anzeigende Korundabbau vorhanden sind (DUBERTRET & KALAFATCIOGLU 1973, S.99). Trotz moderner

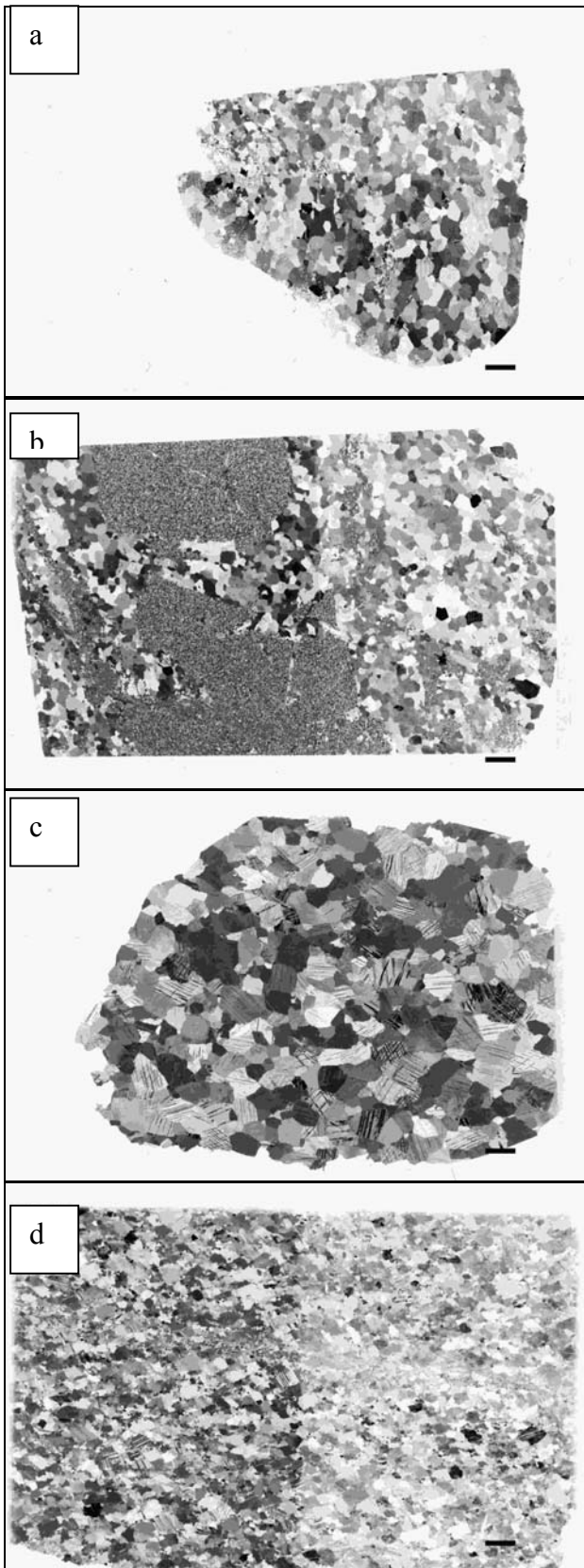


Abbildung 218: Dünnschliffe von Ephesos-Marmoren: a) Aytekin dk mit opaken schwarzen Einschlüssen, b) Aytekin hell mit Dolomitblasten, c) Kursak, d) Kuşini (rechte Hälfte angefärbt), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Abbauspuren sind in dem von ungestörten N-W verlaufenden Klüften durchzogenem Marmoranschnitt Überreste antiker Werksteingewinnung unverkennbar (z.B. ein bearbeiteter Block von $3 \times 2 \times 1,5 \text{ m}^3$).

5 km (laut Straßenschild 13 km) von Kaplancik nördlich von Metropolis entfernt sollen sich ebenfalls antike Abbauspuren befinden. Wir stießen allerdings nur auf eine große moderne Gewinnungsstätte für Marmor, der lediglich zur Schotter- und Splittproduktion geeignet scheint.

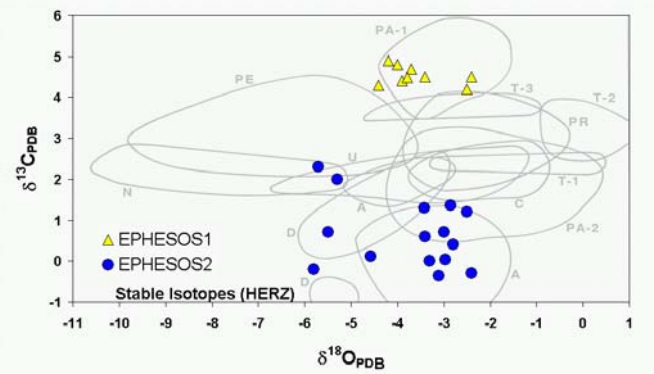


Abbildung 219: Isotopie ephesischer Marmore nach Daten von HERZ (pers. Mitteil. 2003)

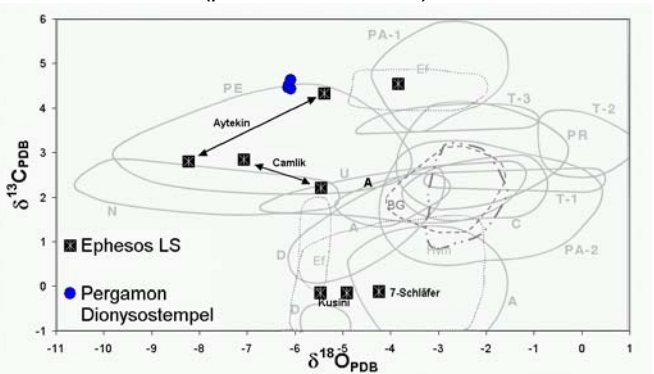


Abbildung 220: Isotopie von Marmoren aus Ephesos und vom Dionysostempel in Pergamon

Entsprechend ihrer unterschiedlichen Entstehungsgeschichten weisen die ephesischen Marmore ein breites isotopisches Verteilungsmuster auf. Die grobkörnigeren Proben von Kursak und die etwas feinkörnigeren Proben des Aytekin-Bruches zeigen ähnlich hohe δC -Werte im Bereich des von HERZ (1987) definierten Ephesos I-Feldes (Abbildung 219), das wiederum im Feld der parischen Lychnites liegt (Abbildung 220). Die Dolomit-, Fe- und Mn-reiche Aytekin-Probe (Ayt_hell) weist eine starke Verarmung der schweren Isotope auf. Wie auch vom Artemision II beschrieben, ist die Probe Ayt_dk mit schwarzen, opaken Einschlüssen imprägniert. Die calcitische Matrix erscheint im Dünnschliff bei beiden Proben

jedoch unverändert. Die geochemischen Daten (Tabelle 27) des wahrscheinlich von hier stammenden Marmors des pergamenischen Dionysostempels liegen durchweg zwischen diesen beiden Varianten des Aytekin-Bruches.

Die Isotopie der Kuşini-Marmore und des Siebenschläferkalksteins fällt in das Ephesos-II-Feld. Die Isotopie eines nur schwach rekristallisierten Marmors, der in einem Splitwerk bei Çamlık abgebaut wird, ist in den hellen und dunklen Partien unterschiedlich, liegt aber zwischen den beiden Ephesoshauptfeldern.

Bei den SEE ist insbesondere das ähnliche Verteilungsmuster der Aytekin-Marmore einschließlich derer des Dionysostempels hervorzuheben, sowie die höheren Gehalte im Vergleich zu den Paros-Lychnites-Proben.

Weitere Angaben sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

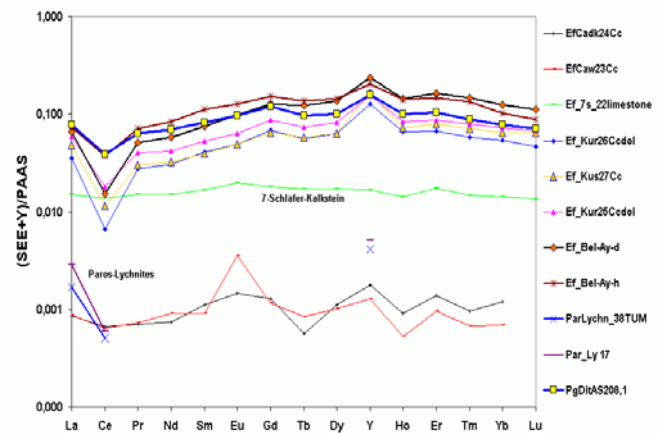


Abbildung 221: SEE-Verteilungsmuster von ephesischen Marmoren und Kalksteinen, Paros Lychnites und dem Dionysostempel von Pergamon

	Ayt dk	PgDion Tpl	Ayt h	Kursak25	Kursak26	Kusini27	Caml dk24	Caml w23	7Schl 22Kalk
MGS/AGS (mm)	2/0,6	2/0,8	2/0,5	3,8/2		2/0,5	fk	fk	fk
Quarz XRD	,40	,28	,25	,15	,18	,27	,27	,27	,66
Dolomit XRD	,00	2,55	20,17	3,67	1,61	,06	,00	,00	,00
Mg Gew% (OES)	,14	1,13	4,21	,74	,78	,18		,10	
Mg ICP-AES				,51	,55	,14	,08	,06	,25
ΣSEE	9,06	11,35	12,47	7,27	4,57	5,61	,15	,15	2,73
ΣSEE/Y	1,41	2,65	2,27	1,72	1,33	1,27	3,05	4,21	5,95
Y/Ho (mol)	83,23	79,48	71,44	94,52	97,46	114,21	98,92	122,84	59,58
Ce* PAAS (LaCePr)	,26	,54	,52	,36	,21	,29	,86	,81	,92
Sr (ICP-MS)	91	106	162	84	71	61	336	457	298
Sr (OES)	95	114	186	58	49	40		467	
Fe (OES)	22	246	946	71	44	109		9	
Fe FI-AAS				61	46	89	27	11	170
Mn (OES)	3,01	23,63	192,01	16,05	15,58	17,83		2,50	
Mn FI-AAS				12,50	13,50	13,50	4,50	,50	8,00
Fe/Sr	,23	2,16	5,07	1,22	,91	2,75		,02	
Ba	1,09	,64	,43	1,22	1,27	1,09	10,65	25,38	11,75
δO	-5,39	-6,14	-8,23		-3,84	-5,19	-7,07	-5,46	-4,24
δC	4,32	4,45	2,80		4,54	-,15	2,84	2,21	-,12

Tabelle 27: Merkmale von Marmoren und Kalksteinen aus Ephesos sowie vom Dionysostempel in Pergamon

6.5.2 Phourni (bei Samos, vgl. 7.12)

Nach BLÜMEL (1963) stammt der Marmor der im 3. Viertel des 6.Jh. v.u.Z. hergestellten *Columna Caelata* von Didyma von der Insel Korassai bei Ikaria, dem heutigen Phourni (auch Phournoi, Fourni, s. Übersichtskarte Abbildung 17 und Abbildung 223). Dies geht auf die Vorstellung der französischen Ausgräber von Didyma zurück, nachdem in dem alten didymäischen Hafen Panormos in der Kovellabucht antike Werkstücke gefunden wurden (RAYET & THOMAS 1877; PESCHLOW-BINDOKAT 1981). Ähnliches wurde von KNACKFUSS (1941)⁶¹ für den gesamten

Apollontempel behauptet, aber von GRUBEN (1963) mit den Worten in Frage gestellt: „Sollte der Marmor des Didymaion nicht eher aus einem Bruch der kleinasiatischen Küste, etwa den Marmorbrüchen bei Herakleia, stammen?“ Die Arbeiten von GERMANN und PESCHLOW-BINDOKAT (1981) erbrachten den ersten Beweis

vielfach durch bläuliche, manchmal fast schieferschwärz erscheinende horizontal geschichtete Streifungen verunreinigter Marmor, der, wie die noch am Panormos lagernde unfertigen Säulentrommeln und andere Blöcke beweisen, auf dem Seeweg herangeschafft wurde. Seine Brüche sind auf den Inseln Korassai (Phurni) bei Ikaria aufgefunden und schon länger bekannt....Die große Festigkeit des vermöge seiner Feinkörnigkeit äußerst bildsamen Marmors wird begünstigt von dem Umstand, dass die blauen Schichtungen nicht, wie etwa bei dem pentelischen Marmor, durch Glimmer, sondern anscheinend durch eine quarzschieferige Masse gebildet werden.“

⁶¹ KNACKFUSS (1941, S. 49): "Das andere Steinmaterial, aus dem alle sichtbaren Teile: Stufen, Bodenbelag, Außenschalen der Wände, Säulen und Gebälk, bestehen, ist ein feinkörniger,

dafür, dass in den antiken Stätten des Unteren Mäandertals tatsächlich weitgehend Marmor aus lokalen Steinbrüchen wie denen am Bafasee Verwendung gefunden hatten. Auch die jetzige Untersuchung besagter *Columna Caelata* (Kapitel 7.5.1) bestätigt, dass ihr Marmor nicht von Phourni stammt, sondern von einem Marmorausbiss am NW-Ufer des Bafasees in der Nähe von Myus (MyLS28). Trotzdem verdienen die Phourni-Brüche eine größere Aufmerksamkeit als ihnen in den letzten Jahren zuteil wurde.

Sowohl die Antenbasis des Athenatempels in Priene (Kapitel 7.11) als auch das Kapitell des 2. Dipteros des Heliostempels auf Samos (Kapitel 7.12) weisen neben der ins Gräuliche spielenden weißen Färbung der feinkörnigen Marmore untereinander eine so deutliche Übereinstimmung sämtlicher petrographischen, geochemischen und isotopengeochemischen Merkmale auf, dass eine identische Marmorquelle angenommen werden muss.

Nach persönlicher Mitteilung des Ausgrabungsleiters von Samos, Hermann J. Kienasts, wurde im Heraion von Samos Marmor aus Steinbrüchen auf den Phourni-Inseln verwendet (s.a. KIENAST 1992). Dies wird auch durch in den Beständen an der TU Berlin aufgefundenen Marmorproben und Dünnschliffen des Heraions und von 3 Brüchen auf Phourni bestätigt, die in den 1980er Jahren von Frau Peschlow-Bindokat zur Verfügung gestellt wurden. Zwar konnten an ihnen keine geochemischen Untersuchungen mehr vorgenommen werden. Sie weisen aber alle die gleichen auffälligen petrographischen Merkmale wie die jetzigen Museumsproben von Samos und Priene auf, insbesondere die bei keinen anderen Marmoren beobachteten dünnen Scharen parallel verlaufender dolomitischer Lagen in einer feinkörnigen Matrix.

Geologisch gehört Phourni zur Pelagonischen Zone (LAZZARINI & CANCELLIERE 2000) und wird durch triassische Ablagerungen, u.a. Kalkstein-Epimetamorphite (GEORGALAS 1924; KOEHNE 1937) gebildet, mit starker Dominanz von Marmoren, Kalk-, Chloritoid- und Glimmerschiefern sowie Phylliten. Marmore kommen im NE und SW der Insel vor (JACOBSHAGEN 1986) und sind wahrscheinlich mit den größeren Ausbissen auf Ikaria, Samos und der Mykale als Teil des Kykladenkomplexes assoziiert (Abbildung 139).

In einer von Lorenzo Lazzarini nach einem Vortrag auf der 7. ASMOSIA-Konferenz zugeschickten Publikation (LAZZARINI & CANCELLIERE 2000) wird ein kleiner Bruch (mit einer erhaltenen Länge von 25 m und bis 10 m Höhe) an der SW-gelegenen Bucht von Petrokopiò auf Phourni beschrieben, der offensichtlich mit dem von A. Peschlow-Bindokat beprobten Brüchen identisch ist. Ältere Beschreibungen (Angaben nach Peschlow-Bindokat) finden sich u.a. bei REHM *et al.* (1929), die auch Proben entnommen hatten und Phourni bereits als Quelle des Didymaions ablehnten, sowie bei PHILIPPSON (1959).

Nach LAZZARINI & CANCELLIERE (2000) deuteten Tonscherben und liegengebliebene Marmorartefakte (bearbeitete Blöcke, Säulenschäfte und Sarkophage) auf eine römische Ausbeutung hin. Die Grundmasse der qualitativ hochwertigen Marmore sei von weißer Farbe mit häufigen milchig-weißen oder gelblichen Streifen; Kompaktheit und Feinkörnigkeit machten ihn gut bearbeitbar und polierbar. Unter dem Mikroskop zeige sich „a heteroblastic, sometimes homeoblastic lineated fabric formed by frequently isooriented calcite crystals accompanied by small trains of K-mica (sericite) and concentrated veins formed by black particles of carbonaceous matter“.

All diese Beschreibungen decken sich mit den eigenen Beobachtungen an den Marmorproben von Phourni und den beiden Museumsstücken. Sie weisen kurvige bis gerade Korngrenzen, schwachen postmetamorphen Stress andeutende Deformationen der Zwillingslamellen und mittlere Korndurchmesser zwischen 0,3 und 0,5 mm bei MGS zwischen 0,6-1 mm (gelegentlich bis 2 mm) auf, ebenso stimmt der akzessorische Mineralbestand überein (gelegentliche Quarzkörner, K-Glimmer, häufiger opake Partikel, darunter mit bis 0,06 mm großen Pyritkörnern assoziierter Limonit, sowie vor allem Dolomit). Wie die Messergebnisse (XRD 0,06-0,5 Gew% Dolomit, Mg 0,35-0,37 Gew%) bestätigen, sind die Dolomitanteile nicht gleichmäßig verteilt, sondern auf die parallelen dünnen Scharen gelblich-weißer Streifen im 5 mm- bis cm-Abstand konzentriert. Dass es sich hierbei um Dolomitlagen handelt, legt auch die Antenbasis im Archiv der Berliner Antikensammlung nahe, die von schmalen, gelblichen Lagen mit einem

streng parallelen positiven Relief durchzogen wird (Abbildung 358 auf S. 240).

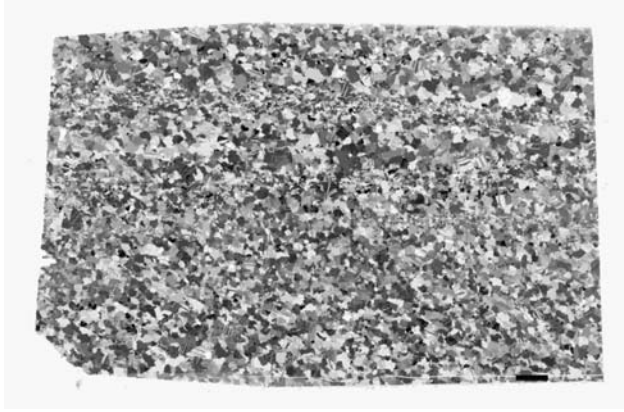


Abbildung 222: Phourni-Marmor im Heraion von Samos mit feinkörnigen Dolomitbändern (Heka4), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Recht deutlich sind sie auch in Abbildung 222 als feinkörnigere Bänder in dem sowieso feinkörnigen Marmor des Heraions (aus einer Probe von Peschlow-Bindokat) wahrnehmbar. Anders als in Abbildung 359 vom Athenatempel ist in dieser Schnittlage allerdings die häufige Kornlängung und Orientierung der Calcitkristalle nicht erkennbar.

Wie LAZZARINI & CANCELLIERE (2000) zutreffend schreiben, ähneln – ohne Berücksichtigung der Dolomitlagen – die Phourni-Marmore den pentelischen, die aber größere AGS (0,9 mm) und wesentlich mehr akzessorische Mineralien aufweisen. Vollkommen verschieden vom pentelischen Feld ist die Isotopie (δO zwischen -2,02 und -2,24, δC zwischen 4,31 und 4,62 bei unseren Proben) und deckt sich mit den von Lazzarini angegebenen Werten (δO -2,7 – -3,9, δC 3,8 – 4,9).

Die Absolutgehalte der SEE sowie Y/Ho (um 95) beider Museumsproben sind fast identisch, stimmen aber auch weitgehend mit denen einer Marmorprobe (R1) überein, die bereits 1995 aufgrund ihrer Isotopie und Petrographie als pentelisch identifiziert worden war. Jedoch ist deren $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ (2,2) gegenüber 1,7 etwas höher, während Ce_{neg} mit 0,7 gegenüber 0,39-0,46 schwächer ausgeprägt ist. Trotzdem sind die SEE zur Unterscheidung beider Marmorprovenienzen eher ungeeignet. Gleiches gilt für die anderen Spurenelementgehalte (Fe 198-280 ppm, Mg 0,35-0,37 Gew%, Sr 112-118 ppm); lediglich Mn liegt bei den untersuchten Phourni-Marmoren (12 und 14 ppm) deutlich unter den üblichen Gehalten pentelischer Marmore.

Trotzdem macht die Kombination aus dem auffälligen petrographischen Erscheinungsbild und der durch hohe δC -Werte gekennzeichneten Isotopie eine Unterscheidung von anderen feinkörnigen Marmoren (Penteli, Carrara, Doki-meion, Paros-Lychnites) insgesamt recht einfach; aber auch die sonstigen untersuchten Marmore der Menderes-Marmorhülle einschließlich der dunkleren und vergleichsweise grobkörnigeren Prienes weisen deutlich unterschiedliche Merkmale auf.

Anders als LAZZARINI & CANCELLIERE (2000) aufgrund der rezenten Überreste vermuten, müssen die Phourni-Marmore bereits vor der römischen Zeit verwendet worden sein, und möglicherweise nicht nur für Teile des Heraions auf Samos oder des Athenatempels von Priene. Ihre Bedeutung nimmt somit eine Mittelstellung zwischen der vor den 1980er Jahren angenommenen großen Verbreitung und ihrer anschließend fast vollständigen Ignorierung ein. Auch spricht ihre gemeinsame Verwendung für engere Beziehungen zwischen dem archaischen und hellenistischen Samos – das lange Zeit eine dominierende Stellung auf Phourni innehatte – und Priene. Genauere geowissenschaftliche und archäometrische Untersuchungen auf Samos, Phourni, Ikaria und der Mykale einschließlich des Abgleichs vorhandener Daten würden angesichts der oben beschriebenen geologischen Verwandtschaft einerseits und der archäologischen Relevanz andererseits sicherlich weitere aufschlussreiche Ergebnisse mit sich bringen.

6.5.3 Samos, Agathonisi und Ikaria

Während Ikaria aufgrund seiner miozänen Granit-Intrusionen schon seit langem dem Kykladen-Komplex zugerechnet wurde, galten Samos, die Phourni-Inseln und das Milet vorgelagerte Agathonisi noch bis vor kurzem als Teil der Hüllserien des Menderes-Kristallin-Komplexes (DÜRR in JACOBSHAGEN 1986), die eine lithologische Einheit mit der Mykale (dem Samsun Dağ) bilden (Abbildung 223). Wie schon dargelegt, werden sie unterdessen allerdings wegen des Vorkommens von Hochdruckmineralien dem Kykladischen Komplex zugeordnet (Abbildung 139).



Abbildung 223: Karte der Inseln vor der Mäandermündung: Samos, Icaria, Agathonisi, Phourni

Die in diesem Kapitel zumeist JACOB SHAGEN (1986) entnommenen geologischen Angaben lassen sie alle als potentielle Lieferanten antiker Marmore in Frage kommen, was in dieser Untersuchung für Samos und Phourni auch bestätigt wurde. Über antiken Marmorabbau auf der nur 8 km langen Insel **Agathonisi** ist nichts bekannt, was umso bedauerlicher ist, da sie fast vollständig aus hellgrauen Kalkmarmoren mit lokal eingelagerten Kalkglimmerschiefern bestehen soll.

Ebenso ungewiss ist eventueller Marmorabbau auf **Icaria**, wo im Mittel- und Nordostteil mehrere Marmorabfolgen, teilweise mit Metabauxitlinsen, in einer niedriggradigen Amphibolitfazies eingeschaltet sind. Im Zentrum der Insel liegt auf der marmorführenden grünschieferfaziellen Messaria-Einheit eine Klippe von Obertrias-Marmoren auf, die, wie auch von Lesbos-Moria bekannt, Megalodonten führen. Die untere Einheit mit Para- und Orthogneisen wird von Marmor- und Glimmerschiefern überlagert und von miozänen Graniten durchzogen. In der Kefala-Einheit und um Faros ist ophiolithische Molasse verbreitet, in die rekristallisierte Karbonatblöcke eingeschaltet sind (PHOTIADES 2002).

Die drei von 1400 m auf 400 m Höhe abnehmenden Bergstöcke im Westen, der Mitte und dem Osten von **Samos** bestehen aus Marmoren und Schiefen. Dazwischen finden sich mächt-

ge neogene Ablagerungen, die auch als Baumaterial verwendeten Kalksteine hervorbrachten. Das westlich des heutigen Phytagorion (der alten Stadt Samos) in Küstennähe liegende Heraion befindet sich im Bereich einer solchen neogenen Schicht und von Alluvionen. Durch den nördlich von Phytagorion gelegenen Ampepos-Berg ließ Eupalimos im Auftrag von Polykratos einen 1036 m langen Tunnel zur Wasserversorgung graben (KIENAST 1990; KIENAST 1995; WOELFEL 1996).

Die geologische Situation von Samos ist komplex. Die westliche nichtmetamorphe Kalithea-Einheit enthält Sandsteine, Peridotite, Spilite und Diabase, Radiolarite und Rote Knollenkalke, darüber triassische Kalke mit Algen, Foraminiferen, Megalodonten und Valvuliniden. An der Küste sind amphibolitfazielle Marmore, Kalksilikatfelse, Amphibolite und Quarzite aufgeschlossen, in die vor 10 Millionen Jahren magmatische Intrusiva eingedrungen sind. Das sonstige Kristallin auf Samos ist hingegen durch Hochdruck-Metamorphose charakterisiert, ein Grund für seine Zuordnung zum Attisch-Kykladischen Komplex. In den bis 1000 m mächtigen Marmorhorizonten der Kerketevs-Einheit finden sich auch Meta-Hornsteine und Diaspor-Korund-Metabauxite. An sie schließen sich nach oben Phyllite mit sandigen Bänken sowie Glaukophan-führende Metabasite an.

Nach Süden und Osten erstrecken sich in der Ampelos-Einheit Wechselfolgen aus Marmoren, in die Meta-Hornsteine, Metapelite, Grün- und Glaukophanschiefer sowie Metabasite und Serpentinite eingeschaltet sind. Im Osten liegt die Vourliotes-Einheit mit zwei mächtigen Marmorformationen, Folgen von Metapeliten und Metaklastiten mit Einschaltungen von Grün- und Blauschiefern, Metagabbros und Serpentiniten. Östlich und südlich von Vathi kommen auch Diasporite vor. Insgesamt kann angenommen werden, dass auf Samos reichlich vorhandene Smirgelvorkommen die Nutzung als abrasives Material für die Gesteinsbearbeitung seit frühester Zeit erlaubten.

Die komplexe geologische Situation auf Samos dürfte auch dafür verantwortlich sein, dass den alten Baumeistern kaum größere qualitativ hochwertige Marmorvorkommen zur Verfügung gestanden hatten, zumal das unwegsame gebirgige Gelände zusätzliche Probleme schuf. Die auf Samos insbesondere für den Bau des Heraion in Frage kommenden Kalkstein- und Marmorvorkommen werden im Kapitel 7.12 ausführlicher diskutiert, die ebenfalls für das Heraion verwendeten Phourni-Marmore im Kapitel 6.5.2 und 7.11.

Die hier nur angerissene Vielfalt von Samos spiegelt sich auch in zahlreicher neuerer Literatur zu seiner Geologie und Petrographie mit weit über Samos hinausreichenden Schlussfolgerungen sowie zu archäologisch-archäometrischen Fragestellungen wieder⁶².

6.5.4 Kykladeninseln Paros und Naxos

Neben der allgemeinen archäometrischen Bedeutung der Marmore von den Kykladeninseln Paros und Naxos (s. Abbildung 16) war ihre Einbeziehung insbesondere aus drei Gründen notwendig: Einmal zur Unterscheidung der feinkörnigen Marmore mit $\delta C > 4$ (Paros Lych-

nites gegenüber Ephesos [Kapitel 6.5.1.3 und 7.7.13], Phourni [Kapitel 6.5.2], Magnesia [Kapitel 7.6] usw.), zweitens zur Überprüfung der Behauptung, die Paros-2/3-Marmore ließen sich nicht klar von den prokonnesischen Marmoren (Kapitel 6.1.2 und 5.1.3) abgrenzen. Drittens deuten an einer (nicht beprobten) Säule in Pergamon mit heteroblastischem Gefüge extrem große Kristallindividuen auf eine naxische Herkunft hin. Obwohl ich selbst auf keiner der Kykladeninseln war, konnte aber auf umfangreiches Probenmaterial und Messdaten der Kampagnen von GERMANN *et al.* (1988) zurückgegriffen werden, die eine der ersten umfassenden multivariaten Charakterisierungen verschiedener Steinbrüche auf Paros und Naxos vorgenommen haben.

Die **parischen** Brüche gehörten zu den ältesten und bedeutendsten Marmorlieferanten der griechischen Antike mit so großen Vorkommen, dass Strabodie Ansicht überlieferte, die Marmore würden in ihnen nachwachsen. Das Vorkommen bei Stefani brachte den im Untertagebau bei Fackelschein gewonnenen Lychnites hervor, dessen hohe Transluzenz, weiße Farbe und Bearbeitbarkeit ihn für die prominentesten Teile von Skulpturen begehrt machte. LEPSIUS (1891), der sie ausführlich beschrieben hat, schätzt, dass aus der Nymphengrotte etwa 30.000 m³ Lychnites extrahiert wurden, GERMANN & KNOLL (1987) haben bei einer Gesamtlänge der Grubenbaue im Einfallen von 130 m für die Gesamtkubatur des bergmännisch geschaffenen Hohlraums über 50.000 m³ berechnet (vgl. auch LIVADAROS & TSAIMOU 1996). Obwohl schon früh eine grobkörnigere Variante im Tal des Elytas sowie weitere Vorkommen bei Lakkos und allgemein am nördlichen Fuß des Marpessangebirges erwähnt wurden (BLÜMNER 1875), ist erst seit den Arbeiten von GERMANN *et al.* (1988) den Merkmalen und der Bedeutung der grobkörnigeren Paros-2 und Paros-3-Marmore (oft auch als Lefkes- oder Chorodaki-Marmore bezeichnet) größere Aufmerksamkeit gewidmet worden. Aufgrund der komplexen geologischen Situation konnten auf Paros Marmore unterschiedlichster Qualitäten abgebaut werden. Die Paros-1-3-Marmore gehören geologisch jedoch alle der Marathi-Einheit an und zeigen trotz aller Unterschiede eine Reihe von Merkmalsüberschneidungen. Demgegenüber weisen die jüngst bei Kostos im

⁶² (MEZGER & OKRUSCH 1985; MPOSKOS 1986; STAMATAKIS 1988; MOURTZAS & STAVROPOULOS 1989; OCKENGA 1989a, b; STAMATAKIS 1989; CHEN & OKRUSCH 1991; PE-PIPER & TSOLIS 1991; STAMATAKIS & ECONOMOU 1991; CHEN & OKRUSCH 1992a, b; ROBERT *et al.* 1992; STAMATAKIS *et al.* 1996; WILL 1996; GIAMMATTEO *et al.* 1997; OBERHÄNSLI *et al.* 1998a; OCKENGA *et al.* 1998; RING 1998; WILL *et al.* 1998; RING *et al.* 1999b; HENRY & DUTROW 2001; LANGELLA *et al.* 2001; FEENSTRA *et al.* 2003).

Karavosgebiet aufgefundenen Paros-4-Marmore stark gelängte größere Kristalloblasten in einer feinkörnigen Matrix mit deutlichen Deformationserscheinungen auf (BRUNO *et al.* 2000; GORGONI *et al.* 2002). In Tabelle 28 sind einige Merkmale der verschiedenen Paros-Marmore beschrieben, die sowohl anhand eigener Messungen als auch Literaturangaben ermittelt wurden. Die Angaben von GERMANN *et al.* (1988) wurden vor allem mit den Fe/Sr-Verhältnissen (vgl. auf S. zur Abgrenzung von prokonnesischen Marmoren) und den MGS ergänzt. Daneben wurden auch einige SEE- und zusätzliche Isotopendaten ermittelt. Letztere zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den vor fast zwanzig Jahren an den gleichen Probenfragmenten ermittelten Werten.

Neuere Untersuchungen (MANIATIS *et al.* 2003) deuten an, dass grobkörnige Marmore von **Naxos** bereits im Neolithikum ihren Weg zumindest nach Thasos gefunden haben (s. auch PIKE *et al.* 1999).

Schriftliche Überlieferungen aus der Antike zu naxischen Marmoren sind wesentlich seltener als zu Paros. Aber der rege Abbau geht schon daraus hervor, das Byzes hier das Schneiden von Marmordachziegeln erfunden haben soll (BLÜMNER 1875; s.a. OHNESORG 1993) und sich in den Brüchen ein großer halbfertiger Apollonkouros befindet. Am Besten erforscht sind

die Brüche von Apollon, Kinidaros, Flerio und Sangri.

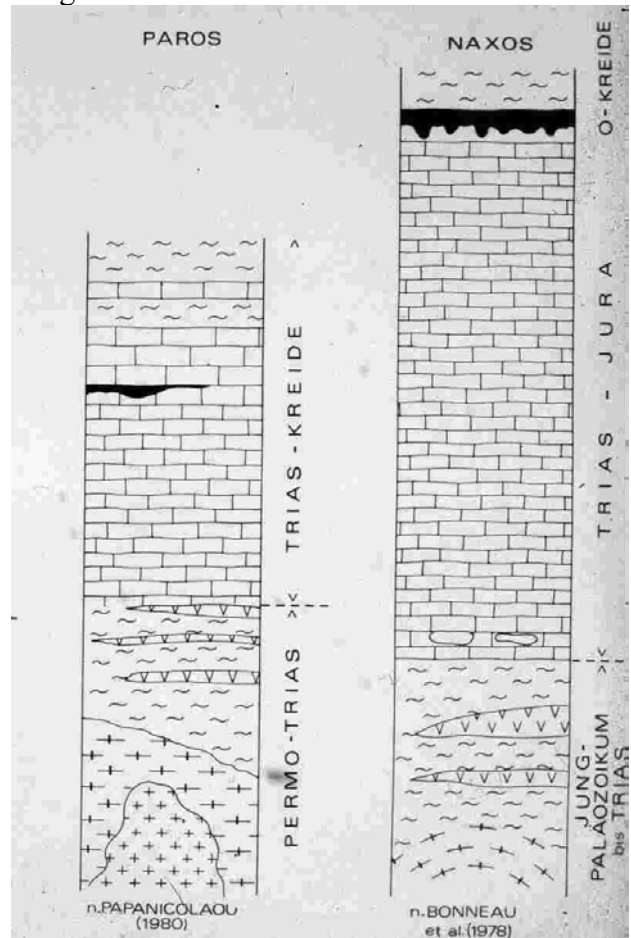


Abbildung 224: Stratigraphische Position der Marmore von Paros und Naxos (nach PAPANIKOLAOU 1980 und BONNEAU *et al.* 1978)

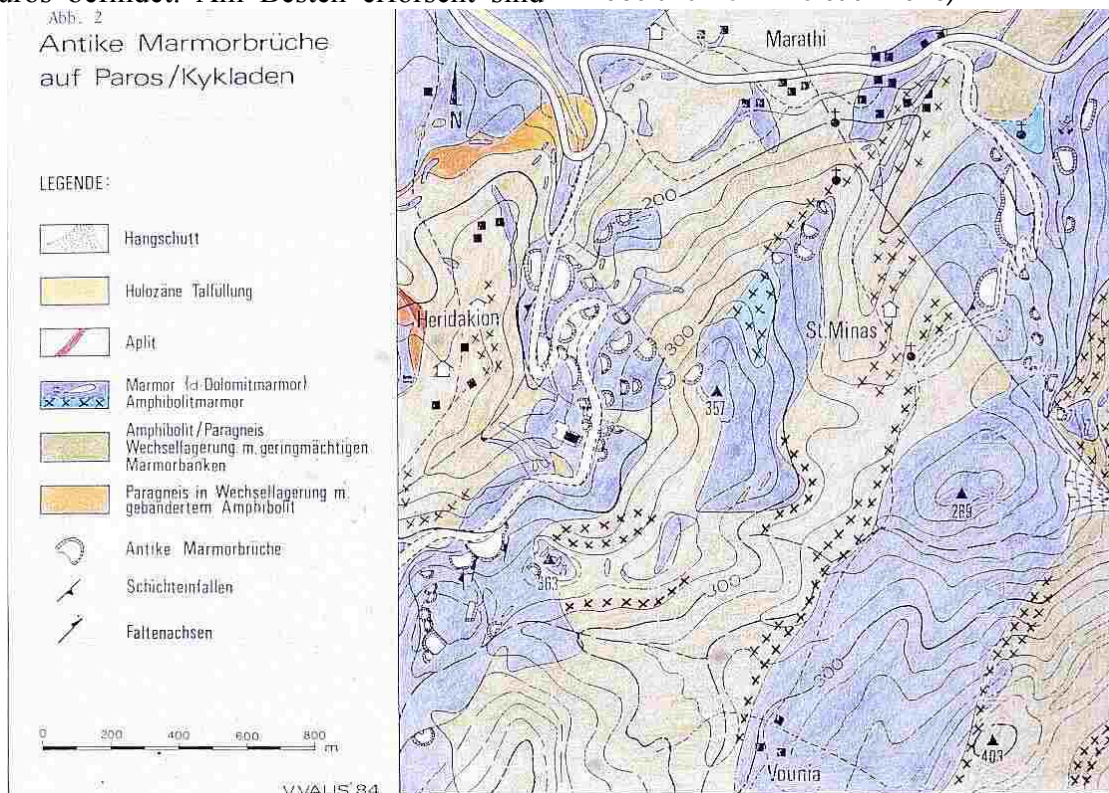


Abbildung 225: Antike Marmorbrüche auf Paros (GERMANN & KNOLL 1987)

Aufgrund petrographischer Untersuchungen gehen ALVAREZ I PÉREZ & DE BRU DE SALA (1984) davon aus, dass sich das Verbreitungsgebiet parischer und naxischer Marmore bis nach Katalonien (Archäologisches Museum von Barcelona und Ausgrabungen von Empúries) erstreckte.

6.5.4.1 Allgemeine Geologische Situation

Detaillierter als in seinen Marmorstudien ging LEPSIUS (1893) auf die Geologie der zweitgrößten Kykladeninsel **Paros** ein und stellte die Verwandtschaft mit dem Kristallin von Naxos fest. Ihm folgten PHILLIPPSON (1901) und NEGRIS (1915). TRIKKALINOS (1947) entdeckte nichtmetamorphe Kreide (s.a. ANGELIER *et al.* 1978; ROESLER 1978; DERMITZAKIS & PAPANIKOLAOU 1979; GAUTIER *et al.* 1990). Umfassender wurde das Kristallin von Paros und die Ägäischen Inseln insgesamt seit Mitte der 1970er Jahre von PAPANIKOLAOU (1977; 1996) untersucht. Nach ROBERT (1982) und insbesondere GERMANN *et al.* (1988) wird der geologische Bau auf Paros durch eine Serie von Migmatiten, Gneisen (Lefkes und Paroika), kristallinen Schiefen sowie Marmoren gekennzeichnet, in die granitische Gesteine intrudierten (vgl. auch SCHLIESTEDT *et al.* 1987; THEOFILOPOULOS 1990). Von den auf einem kristallinen Sockel übereinandergestapelten tektonischen Gesteinseinheiten ist die von Marmara nichtmetamorph, die von Dryos schwach metamorph; die Marmorvorkommen beschränken sich im Wesentlichen auf die im Zentralteil der Insel südlich von Marathi aufgeschlossenen Einheiten (Abbildung 225). Leithorizont der bauwürdigen Marmore ist im Liegenden eine Marmor-Amphibolit-Wechsel-lagerung (GERMANN & KNOLL 1987).

Die Untersuchung der Ursachen und Auswirkungen der großen Migmatitintrusion wie auch der beträchtlichen Smirgelvorkommen auf **Naxos** haben umfangreiche, oft exemplarische geowissenschaftliche Arbeiten und Veröffentli-

chungen hervorgebracht, nicht selten im Vergleich und Zusammenhang mit Paros (soweit nicht schon bei Paros aufgeführt u.a. SCHUILING & OOSTEROM 1967; ZIMMERMANN *et al.* 1974; RYE *et al.* 1976; KREULEN 1988; STRUMPF & DUERR 1992; STRUMPF & ENGEL 1996; STRUMPF 1997; STRUMPF & ENGEL 1997; LEWIS *et al.* 1998; LEWIS 1999; KATZIR & VALLEY 2001; MATTHEWS *et al.* 2002). Zur Diasporit/Korundit-Problematik s. a. Einleitung von Kapitel 2.5.6.



Abbildung 226: Bearbeitungsspuren an untertägigem Lychnites-Marmorabbau (GERMANN & KNOLL 1987)



Abbildung 227: Antike Brüche von Paros II (GERMANN & KNOLL 1987)

6.5.4.2 Merkmale der Paros- und Naxos-Marmore

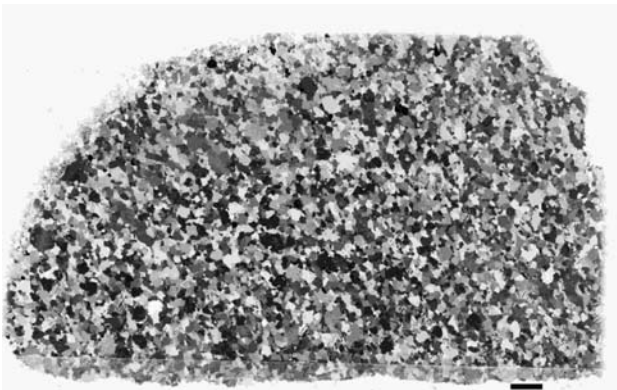


Abbildung 228: Paros Lychnites (PaLy22,5), N+, Maßstabsbalken 2 mm

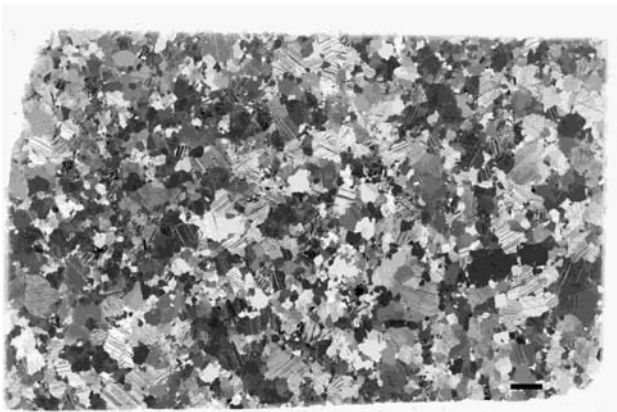


Abbildung 229: Paros W-Marmortal (P23,4)



Abbildung 230: Prokonnesischer Marmor (GF110-7), N+, Maßstabsbalken 2 mm

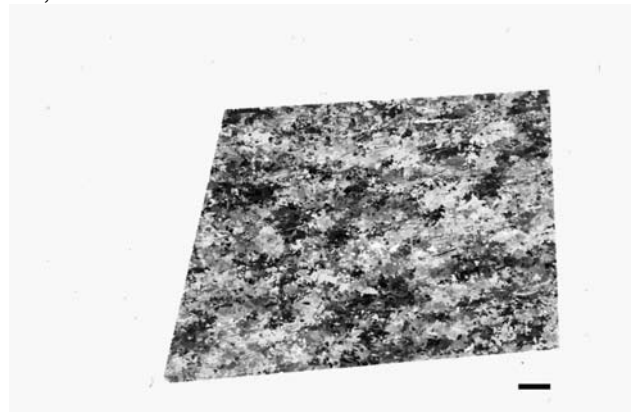


Abbildung 231: Feinkörniger Siphnos-Marmor (Pa-Siph215), N+, Maßstabsbalken 2 mm



Abbildung 232: Grobkörnig-heteroblastischer Marmor von Naxos Flerio, Kouros (21_13), N+, Maßstabsbalken 2 mm

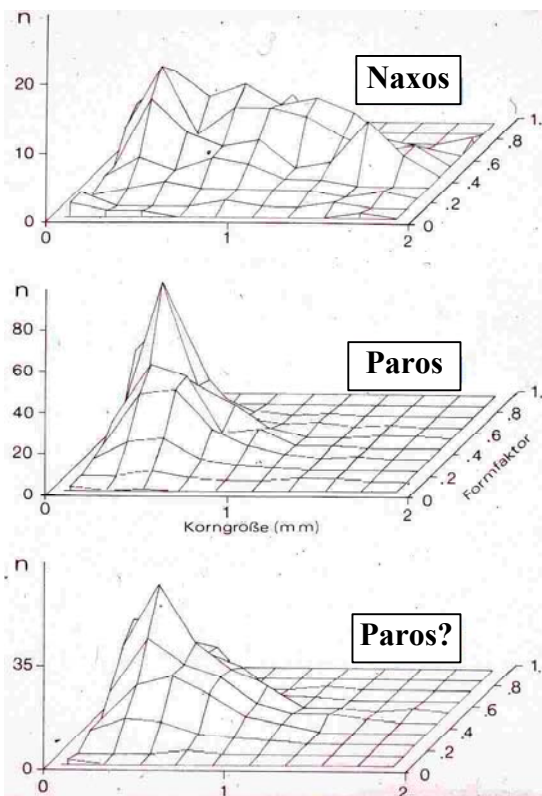


Abbildung 233: Korngrößen (AGS) und Formfaktoren parischer und naxischer Marmore (GERMANN & KNOLL 1987). Die antiken Objekte unten wiesen ein parisches Muster auf

Obwohl die feinkörnigen Lychnites sich meist durch ein homogenes Gefüge mit relativ geraden Korngrenzen (Abbildung 228) und hoher Transluzenz auszeichnen, sind sie doch stärker deformiert als manche der ephesischen Marmore (vgl. Abbildung 340). Demgegenüber weisen viele der Paros-2 und Paros-3-Marmore (Abbildung 229) ein deutlich grobkörnigeres, heterogenes Gefüge auf (vgl. auch Angaben in Tabelle 28). Trotz ihres oft größeren Korns (0,5-4,8 mm) sind sie durchaus nicht immer leicht von den prokonnesischen Marmore

(Abbildung 230) unterscheidbar, aber ihnen fehlt z.B. die charakteristische Bänderung der Marmara-Marmore wie auch das Auftreten des Geruchs nach H_2S beim Zermahlen⁶³, und unter dem Mikroskop zeigen sie oft einen höheren Anteil an akzessorischen Mineralien, besonders Glimmern. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal sind die meist höheren Fe- sowie niedrigeren Sr-Gehalte (nur vier Kykladenmarmorproben weisen 200 und mehr ppm Sr⁶⁴ auf), die sich insbesondere in einem höheren Fe/Sr-Verhältnis (Abbildung 71 auf S. 93) ausdrücken. Ähnliches gilt für Mn (Abbildung 104). Beträchtlich größer ist die isotopische Variationsbreite der parischen Marmore (Abbildung 235). Ein Teil der östlichen Marmortalproben besitzt die charakteristische schwere Kohlenstoffisotopie-Werte parischer Lychnites ($\delta C > +4$), von denen einige aber auch beträchtlich leichter sein können und in das PA-2-Feld fallen.

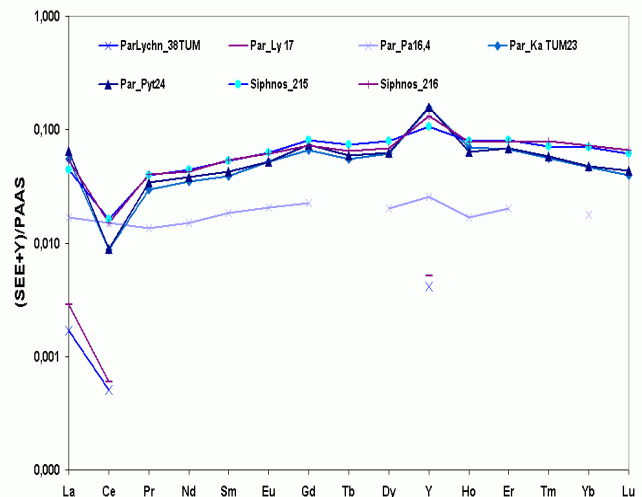


Abbildung 234: SEE parischer Marmore mit sehr niedrigen Gehalten der Lychnites

Nur geringe Aussagekraft besitzen die wenigen SEE-Verteilungsmuster (Abbildung 234). Auffällig sind allerdings die teilweise unterhalb der Nachweisgrenze liegenden niedrigen Gehalte der beiden Lychnites-Proben (vgl. Abbildung 221 auf S. 165). Die beiden Messwerte feinkör-

⁶³ Bemerkenswerterweise strömen viele der weißen feinkörnigen Lychnites und Östliches Marmortalmarbre beim Zerbrechen einen deutlichen Geruch nach faulen Eiern aus.

⁶⁴ Allerdings werden in der Literatur für Paros und Naxos auch höhere Sr-Gehalte angegeben (ROOS *et al.* 1988).

niger Siphnos-Marmore (Abbildung 231) liegen eng beieinander. ParKaTUM23 (Kastro) und ParPyt24 (Pythion) sind petrographisch nicht zu unterscheiden und besitzen auch isotopisch und geochemisch fast identische Werte.

Merkmale von Naxos-Marmoren

Aus nicht weiter differenzierten Literaturangaben und insbesondere den Messwerten der Arbeitsgruppe Germann von 1988 sind Eigenschaften von Naxos-Marmoren in der unteren Zeile von Tabelle 28 zusammenfassend dargestellt (meist größte und kleinste Angaben).

Die Naxos-Marmore gehören zu den grobkörnigsten aller in der Antike verwendeten Marmorwerksteine (Abbildung 232 und Naxos-Iria in Abbildung 31 (i) auf S.59). Zugleich weisen sie ein extrem heterogenes Gefüge auf, wie schon die weite Spannbreite der MGS von 2 - 12 mm (ROOS *et al.* 1988) andeutet (vgl. auch Abbildung 233 sowie Abbildung 77 - Abbildung 81 ab S. 105).

Dieses auffällige petrographische Merkmal lässt sich auf eine spätere Metamorphosephase im Zusammenhang mit der Intrusion eines Migma-

titdomes zurückführen. Sie ist auch für die starke Verarmung schwerer Sauerstoffisotopen verantwortlich, so dass die Isotopie ein Band belegt, das von Überschneidungen mit dem Paros-2-Feld bis nach $\delta O = -16$ reicht. Obwohl die Daten der Naxos-Sangri-Marmore bereits von GERMANN *et al.* (1988) veröffentlicht worden waren, blieb das – auf MOENS *et al.* (1992) zurückgehende – meist in der Literatur verwendete Isotopenfeld naxischer Marmore so klein wie in Abbildung 235 dargestellt. GORGONI *et al.* (2002) geben unterdessen für δC sogar Maximalwerte bis 3,8 und für δO bis -16,2 an. Weniger ausgeprägt sind die geochemischen Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen den beprobten Lagerstättenmarmoren auf Paros und Naxos. In Abbildung 236 fallen insbesondere die hohen Mn-Gehalte der Apollon-Marmore sowie die hohen Fe- und Mn-Gehalte der Sangri-Marmore auf. Der Maximalwert für Sr von 165 ppm ist vergleichsweise niedrig. Die erfassten SEE-Gehalte liegen fast alle im Bereich parischer Marmore (Abbildung 234) und stützen damit – mit Ausnahme der Lychnites – die Annahme eines ähnlichen Ausgangsgesteins der parischen und naxischen Marmore.

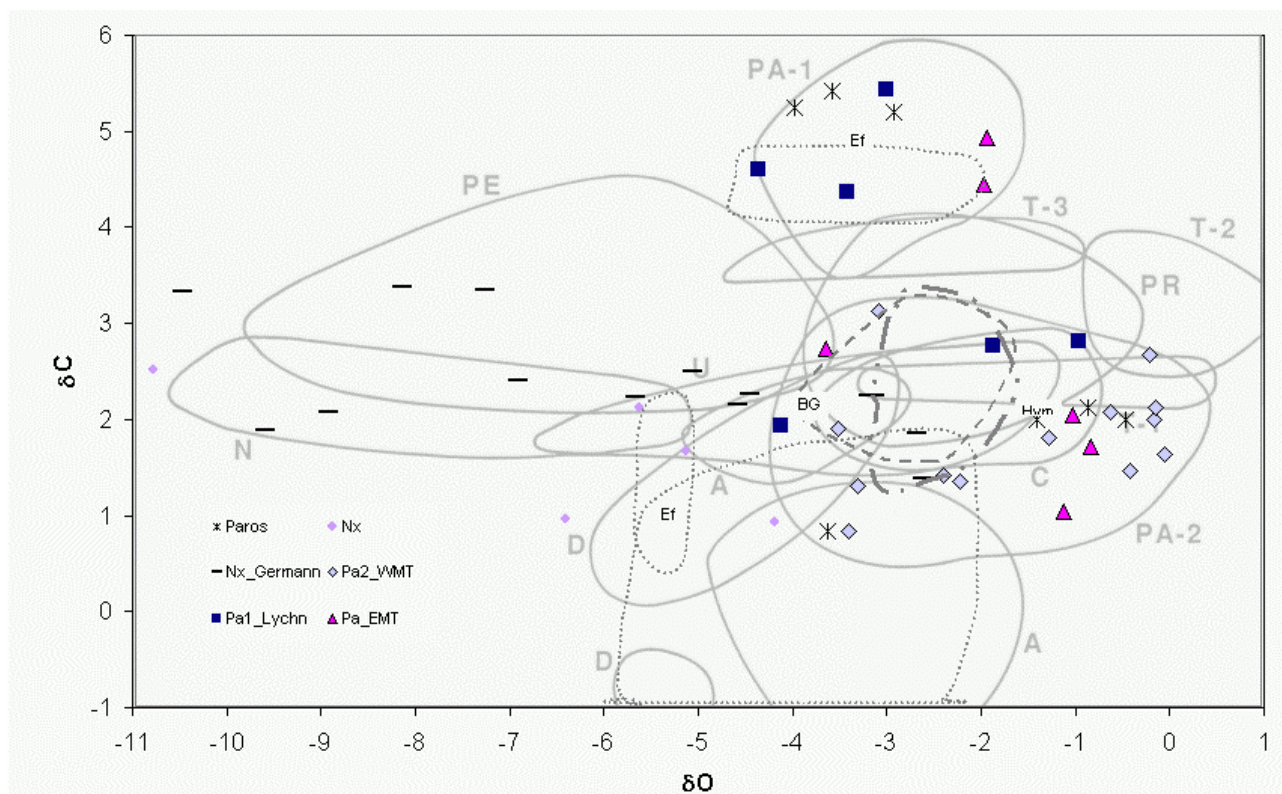


Abbildung 235: Isotopie parischer und naxischer Marmore. Die drei als „Paros“ bezeichneten Werte im PA-1-Feld entsprechen Lychnites bzw. einer Probe vom östlichen Marmortal. Die δC -Werte >3 der Naxos-Marmore stammen von Proben aus Sangri (Werte meist von GERMANN *et al.* 1988)

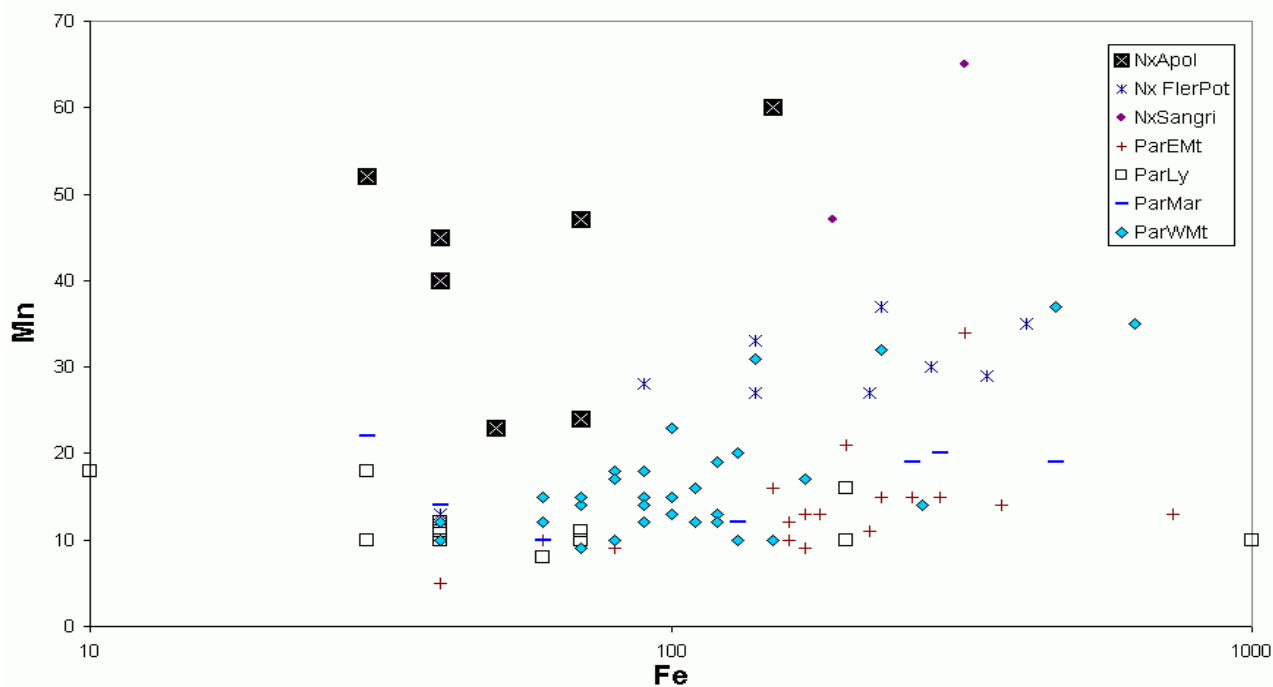


Abbildung 236: Fe/Mn parischer und naxischer Marmore (Ausschnitt, Werte meist GERMANN et al., 1988)

Quarry	Author	Notes	Petrography	MGS mm	AGS mm	Gb	Tl	Minerals AIR	Mg wt%	Mn ppm	Fe ppm	Sr ppm	Fe/Sr	ΣREE ppm	ΣREE/Y	Ce _{f,neg}	δC	δO
Paros	(Roos et al. 1988)	strong local differences	white/ mostly hom, sts het, few mortar or ribbon, de-form. twin-lamellae	1,8-3,5-4,8	0,1-0,4		sts	pure Cc, <20wt% vf dol, few qz, musc. fine grph	0,14/0,26/0,47	1,68/6/39	4,77/41,6/301	56/160/293					3,5/5	-4,5/-2,8
Paros 1-Lychnites, Stefani	(GORGONI et al. 2002)		He/Ho, mosaic fabric	0,8-1,5-2,8		cu											3,2/6	-4,8/-1,8
Paros 1-Lychnites, Stefani	(GERMANN et al. 1988)	SE Marathi, underground mining,	white brilliant, translucence, hom.		0,4-0,45-0,55	ev	vf	Cc, 0,02-0,67wt% AIR	0,1/ 0,2/ 1,6	8/ 10/ 18	10 / 50 / 200	80 / 145/ 200	0,05-0,57-1,43				1,94/5,44	-4,36/-0,97
Paros 1-Lychnites, Stefani	Cramer	2 geoch. samples	hom (sts. het)	1,2-2,2 (3,8outl)	0,4-0,74	ev/cu	vf	Cc, no dol	0,1/ 0,2/ 2,5	2,5/ 4/ 5,2	10,5/ 10,7	174/ 190/ 226	0,05/ 0,06	0,1/ 0,16	0,9/ 1,1	0,2/ 0,3	5,25/5,42	-4,0/-3,6
Paros 2 W' Marble valley	(GERMANN et al. 1988) (Cramer)	SW Marathi >20 aq, 37 samples	hom (het)	2-4	0,35-1-1,3 (0,3-1,4)	cu/ em			0,08 /0,27/ 1,93	9/ 14/ 37	30/ 105/ 603	53/ 100/ 250	0,38/ 1,4/ 6,3				0,83 / 3,12	-3,5/-0,1
Paros 2-3 Lefkes	(GORGONI et al. 2002)	"Germann's P 2+3"	he, mosaic, sts with strained crystall	0,5-2,2-4,8		cu/ emb											0,5 / 3,2	-4,5/ +1,5
Paros 3, E' Marble valley	(GERMANN et al. 1988), (Cramer),	SE Marathi, small aq	ho/he	0,8-4	0,5-1-1,1 (0,3-0,95)				0,11/ 0,34/ 5,1	5 / 13 / 34	40/ 170/ 730	32/ 118/ 116	0,25/ 1,8/ 6				1,04 / 4,93 (5,2)	-3,7/-0,8
Paros Marathi	(GERMANN et al. 1988)				0,35-0,15			0,04-0,24wt% AIR	0,14/0,3/ 0,45	10/ 15/ 22	30/ 130/ 460	90/ 130/ 250	0,1/ 1/ 3				1,9 / 2,1	-3,5/-0,63
Paros 4 Karavos area near Kostos	(BRUNO et al. 2000; GORGONI et al. 2002)	petrogr very distinctiv HE/Ho, lineated, fine grained with coarse stressed crystall		1-1,8-3		emb											0 / 2	-5,5/-3,5
Naxos	GERMANN, CRAMER, ROOS, GORGONI	extremely het, cataclastic deformation		1,7 - 12	0,4-3	emb, sut.		few: qz, musc; fine dol, Fe-ore, graph, 0,1-0,7wt% AIR	0,1/ 0,9/ 1,6	3/ 37/ 120	24/ 170/ 1600	50/ 150/ 298	0,25/ 1/ 30	0,5-2	0,9/ 1,2	0,3/ 0,4 Y/Ho 104/ 133	0,5/ 3,8	-16/ -2

Tabelle 28: Synopsis einiger Merkmale parischer und naxischer Marmore nach Literaturangaben und eigenen Messungen (ohne Wiederholung aller Angaben aller Autoren).

Zahlenangaben meist Minimum/Mittelwert/Maximum, aq: ancient quarry, He/Ho: heterogene/homogene Korngrößenverteilung, Gb: grainboundary (even, curved, embayed, sutured), Tl: twinning lamellae (sometimes, very few), AIR: acid insoluble residue

6.5.5 Pentelikon

Eine der bedeutendsten antiken Marmorlagerstätten sind die Brüche des Pentelikonberges bei Athen (siehe Karte Abbildung 16). Ein großer Teil des hellenistischen Athens wurde aus ihren Marmoren errichtet, so der Parthenon, die Propyleen und der Zeustempel. Die Brüche befinden sich 14 km NE vom Athener Stadtzentrum in 500 – 1000 m Höhe. Ihre Existenz ist seit dem 6. Jh. v. u. Z. bekannt (ATTANASIO 2003), ein systematischer Abbau erfolgte bis ins 4. Jh. u. Z. und wurde in moderner Zeit wieder aufgenommen. Ihre Brüche erstrecken sich über ein weites Gebiet des Pentelikon und wurden petrographisch bereits von LEPSIUS (1891; 1893) beschrieben, später von KORRES (1995) detailliert kartographiert.

Unterdessen gehören sie zu den besterforschten antiken Marmorlagerstätten mit einer beachtlichen Fülle an Veröffentlichungen⁶⁵. Ihre Bedeutung ist nicht nur der Nähe zu Athen geschuldet, sondern auch den homogenen Eigenschaften der beträchtlichen verfügbaren Vorräte, die sie nicht nur für Architekturteile, sondern auch für Skulpturen und Sarkophage prädestinierten. Die Marmore sind feinkörnig (Abbildung 237), gut polierbar und für detailreiche Skulpturen bestens geeignet, zumeist homogen weiß und nur gelegentlich von Glimmerlagen etc. durchzogen, dolomitische Anteile sind selten. Es gibt auch dunklere Varianten, die aber abgesehen von denen aus den Brüchen bei Kokkinaras (GOETTE *et al.* 1999), die leicht mit hymettischen Marmoren verwechselt werden, in der Antike keine Rolle gespielt haben sollen. Ihre im Calcitkristallgitter eingebauten hohen Fe-Gehalte machen sich nach einiger Zeit in einer gleichmäßig verteilten goldfarbenen Patina bemerkbar, die sie schon äußerlich von anderen feinkörnigen Marmoren unterscheidet und immer wieder als auffälliges Merkmal beschrieben wurde (so bereits BLÜMNER 1875). Hymettische Marmore sind meist unregelmäßig graustreifig und strömen, anders als pentelische

Marmore, beim Aufmahlen einen intensiven Geruch nach faulen Eiern aus.

Zwar wurden pentelische Marmore in dieser Untersuchung weder systematisch noch gar mit dem Anspruch auf auch nur annähernde Vollständigkeit erfasst, ihre punktuelle Charakterisierung erwies sich aber trotzdem gelegentlich als notwendig. Detailliertere Merkmalsbeschreibungen zur Unterscheidung von anderen feinkörnigen Marmoren werden in den Kapiteln 7.7.8.1.1 und 7.7.14 diskutiert. Nur eine der Museumsproben aus Myus (s. Kapitel 7.4.2) ähnelt aufgrund ihrer Isotopie (Kapitel 7.2), Geochemie, Feinkörnigkeit und Patina pentelischen Marmoren. Eine pentelische Herkunft wird jedoch von archäologischer Seite stark angezweifelt.

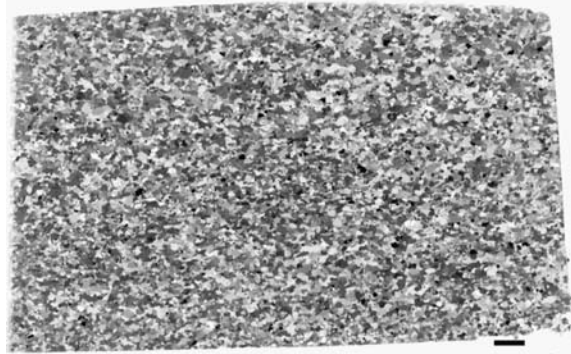


Abbildung 237: Feinkörniger pentelischer Marmor vom Tiberufer (R1), N+, Maßstabsbalken 2 mm

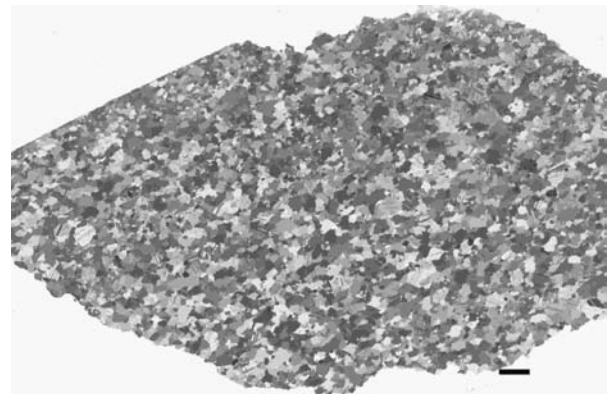


Abbildung 238: Etwas grobkörnigere Variante pentelischen Marmors (Hp-Lnd), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Als Vergleichsmaterial dienten auch 2 archäologische Proben mit eindeutig pentelischen Merkmalen, die aber aus dem Untersuchungsrahmen herausfallen: die Probe R1 vom Tiberufer (MAISCHBERGER 1997) und zwei Fragmente (s. Abbildung 238) mit zunächst unklarer Herkunft. Von letzteren findet sich eine für pentelische Marmore charakteristische Kathodolumineszenzaufnahme in der Abbildung 53: KL-

⁶⁵ Eine Auswahl (ohne Abstracts) zu Penteli-Marmoren: (HERZ & PRITCHETT 1953; MARIOLAKOS *et al.* 1976; CARTER 1983; KORRES 1984; ROOS *et al.* 1988; MATTHEWS *et al.* 1992; KORRES 1995; ABRALDES 1996; FISCHER *et al.* 1998; IKE & OTAKI 1998; KORRES 2000; PIKE 2000; MARAVELAKI 2001; SCHILARDI & CHIOTIS 2001; POLIKRETI *et al.* 2003).

Penteli. Trotz des sehr weitgespannten Isotopenfeldes eignet sich die Isotopie recht gut zur Unterscheidung von einigen anderen feinkörnigen Marmoren, da letztere eher das Feld schwererer Sauerstoffisotopen besetzen. Die Phourni-Marmore liegen nicht nur in einem Feld mit hohem δC_{PDB} über 4, sondern weisen neben einer anderen Geochemie vor allem charakteristische Scharen feiner Dolomitlagen auf.

6.5.6 Hymettos

8 km südöstlich der Athener Akropolis liegen die Brüche von Hymettos (siehe Abbildung 16). Sie gehören einem 20 km langen und bis 1000 m hohen Bergrücken in NS-Erstreckung an. Von hier war der Transport hangabwärts in die Stadt und den Hafen von Piräus leicht zu bewerkstelligen. Seine Marmore wurden seit der frühesten Antike abgebaut und waren bis in die römische Kaiserzeit weit verbreitet. Wegen seines starken Geruchs bei der Verarbeitung, der ihm den Namen *marmo cipolla* einbrachte,

wurde er aber später häufig mit ebenfalls starken Geruch ausströmenden prokonnesischen Marmor gleichgesetzt und verwechselt (s. z.B. ATTANASIO *et al.* 2003a). Wie pentelischer Marmor ist er sehr feinkörnig, wobei die meisten unserer pentelischen Dünnschliffe etwas differenziertere Kristalle mit größeren Korndurchmessern aufweisen (MGS 0,4-0,8 / 0,6-2 mm; AGS 0,2/ 0,2-0,8 mm). Die Farbe der hymettischen Marmore ist meist grauer, oft mit einem Blaustich; sie sind gestreifter und ohne goldene Patina. Daneben sollen sie eine niedrigere ESR-Intensität besitzen (ATTANASIO 2003), also Mn-ärmer sein. Dies korrespondiert mit unseren – wenigen – Messwerten (Mn < 10 ppm gegenüber > 45 ppm, Fe 25-62 // 134-276 ppm). Auch ist die Isotopie beider Lagerstätten deutlich verschieden, während sie bei Hymettos- und Carrara-Marmoren stärker überlappt. Eine detaillierte Diskussion erfolgt am Beispiel des Waffenreliefs im Marmorsaal von Pergamon (Kapitel 7.7.14).

6.6 Carrara

Das italienische Carrara ist der weltweit größte Marmorproduzent der Gegenwart (> 1 Mio. t/a). Von der Römerzeit an kam die Marmorgewinnung dort langfristig nur während extremer Stagnations- oder Krisenperioden vollständig zum Erliegen, um seit der Renaissance wieder anzusteigen, wozu kontinuierliche Werkstatt- und Lobbytätigkeit wie die der Lazzerini-Familie von 1670 bis 1942 beitrugen (PASSEGGIA 2000). Seit dem Ende des 18. Jhs. und insbesondere mit dem wachsenden Bedarf an repräsentativem Bau- und Skulpturmaterial im anbrechenden Industriezeitalter verbreiteten sich Carrara-Marmore rasch weltweit und können beispielsweise bereits um 1850 in Neufundland nachgewiesen werden (POLLOCK 2004). Als leicht verfügbare Marmore sind sie – nicht nur in archäometrischer Hinsicht – sehr detailliert untersucht worden und boten Anlass für eine unterdessen kaum überschaubare Publikationsliste, darunter einige grundlegende Werke zu Eigenschaften und Bestimmungsmerkmalen von Marmoren⁶⁶. Die Carrara-Region im Nordwesten der Apuanischen Alpen weist hunderte von Brüchen in verschiedenen Lokalitäten verteilt auf. Hinzugezählt werden müssen die Brüche von Seravezza, die seit Michelangelo zu größerer Berühmtheit gelangt sind. Sie werden meist mit den Carrara-Marmoren zu einer Gruppe zusammengefasst. Ihre Gesamtfläche wird auf 67 km² geschätzt, ihr potentiell abbaubares Volumen auf 60 Mrd. m³ (BAVASTRO *et al.* 2002). Da sie auch Teilgebiet eines Projekts an

⁶⁶ Hier eine Auswahl (ohne Abstracts) zu Carrara-Marmoren: (ANONYMOUS 1846; RAMEZ & MURRELL 1964; KLAPISCH-ZUBER 1969; CONSIGLIO 1972; GESTRI 1976; ASMUS 1978; ACCARDO *et al.* 1981; MELLO 1983; HERZ & DEAN 1986; CORDISCHI *et al.* 1988; MOENS *et al.* 1988b; MANNONI & MANNONI 1989; NEIL 1989; CASTELNUOVO 1992; BRUNI *et al.* 1995; MELONI *et al.* 1995; FISCHER *et al.* 1998; MAHMUTOGLU 1998; ALBER & HAUPTFLEISCH 1999; COSTAGLIOLA *et al.* 1999; HENCHMAN 1999; LEIVICK 1999; MOLLI & HEILBRONNER 1999; PIERI 1999; ATTANASIO *et al.* 2000; BARONI *et al.* 2000; HOIGARD 2000; MOLLI *et al.* 2000; SIEGISMUND *et al.* 2000; COVEY 2001; MANIATIS & POLIKRETI 2001; MERLINO & ORLANDI 2001; PIERI *et al.* 2001a; RAPETTI 2001; ROHLER 2001; SÄRKÄ *et al.* 2001; MEER 2002; SHERMETI-KABASHI 2002; HAMPTON 2003; LEISS & MOLLI 2003; BARNHOORN *et al.* 2004; RAMSEY & CHESTER 2004).

der TU Berlin zur Verbesserung der Möglichkeiten untertägigen Marmorabbaus (KOCH-MOECK 2004) sind, wurde der zur Verfügung stehende Bestand an Carrara-Probenmaterial aufgestockt. Leider fand ich keine Gelegenheit, dieses wichtige Abbaugbiet zu inspizieren.

Wahrscheinlich hat Marmor aus dieser Region bereits vor dem Aufstieg Roms seit dem 4. Jh. v.u.Z. sporadisch lokale Verwendung gefunden (ATTANASIO 2003). C-14-Altersbestimmungen an verkohlten Holzresten in Carraramarmor-Abschlagmaterial ("ravaneto") ergaben radiometrische Datierungsintervalle zwischen 763-409 und 405-205 v.u.Z. (BRUSCHI *et al.* 2004). Unter der Bezeichnung Lunensischer Marmor wurde er seit dem 1. Jh. v.u.Z. systematisch abgebaut und verbreitete sich im gesamten Römischen Imperium, seit Augustus zunächst vor allem in Rom selbst, aber bald auch bis nach Gallien und Nordafrika. In unserem Untersuchungsgebiet fanden sich – abgesehen von einer modernen Ergänzung am Pergamonaltar – keine Hinweise für die Verwendung von Carrara-Marmoren, weshalb deren Eigenschaften nur grob skizziert werden – insbesondere zur Differenzierung gegenüber anderen feinkörnigen Marmorvarietäten.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind die Eigenschaften der weißen Carrara-Marmore eng eingrenzbar; dieser Homogenität ist es auch geschuldet, dass die verschiedenen Lokalitäten lediglich analytisch nicht sicher unterschieden werden können.

Hervorstechendes Merkmal ist ihre Feinkörnigkeit (durchschnittliche MGS 0,71 mm (ATTANASIO 2003)), die sie mit anderen klassischen Lagerstätten gemein hat (u.a. Penteli, Hymettos, Afyon, teilweise Milas).

Wie sich diese feinkörnigen Marmore trotzdem differenzieren lassen, wird in den entsprechenden Kapiteln und an einigen Fallstudien gezeigt (Pergamon Kapitell 7.7.8.1.1: Großer Fries 109E; 7.7.14: Marmorsaal - Waffenrelief (Hymettos)). Ihr höherer Anteil an akzessorischen Mineralien drückt sich auch in häufigen Bänderungen aus, die in der Regel aber den vorherrschenden weißen Farbton nicht verändern. Häufig tritt bei den weißen Varianten ein sehr klares homogenes polygonales Korngefüge auf.

Gegenüber pentelischen Marmoren sollen sie sich durch niedrigere EPR-Intensitäten abgrenzen lassen (ATTANASIO 2003), wären also Mn-

ärmer. Hymettische Marmore sind meist grauer und gestreift und strömen beim Zermahlen einen charakteristischen Geruch aus.

6.7 Wunsiedel

Die sehr wenigen Marmorlagerstätten in Deutschland sind von kleinen Ausmaßen und geringer Qualität (Auerbach/Bergstraße, Thermalsinterkalk von Böttingen, Kaiserstuhl, Fichtel- und Erzgebirge). Deshalb hatten Marmore als Bau- und Skulpturmaterial kaum eine praktische Bedeutung und konnten insgesamt nie eine größere Rolle spielen.

Von den wenigen bauwürdigen sächsischen (Lengefeld, Erzgebirge) und bayrischen Vorkommen wird hier das von **Wunsiedel** nur deshalb gestreift, weil es offensichtlich Material für **moderne Ergänzungen am Pergamonaltar** geliefert hatte (Kapitel 7.7.8.1.2). Es handelt sich um mittel- bis grobkörnige (MGS 3,4-4, AGS 1-1,2 mm) Marmore, meist mit homogenem Korngefüge, die dank ihrer Färbung, dunklen Bänderung und Korngröße prokonnesische Marmore unauffällig ergänzen können.

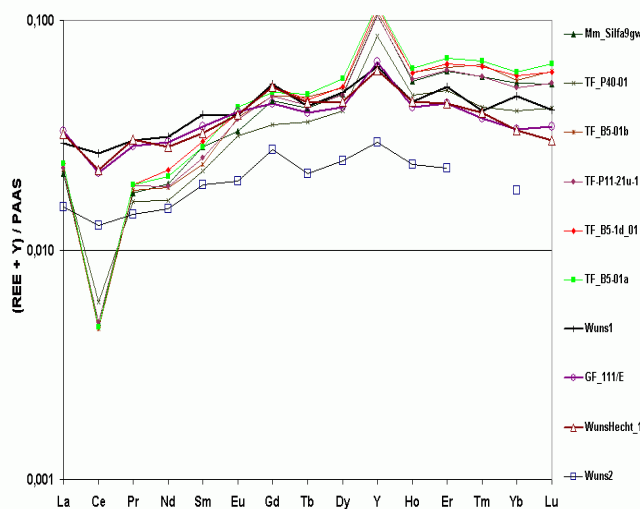


Abbildung 239: SEE von Marmoren aus Wunsiedel und der Ergänzung am Pergamonaltar mit höheren Ce- und niedrigeren Y-Gehalten sowie von Marmara

Zwar fällt die Isotopie der modernen Ergänzung GF 111E (δC 2,32, δO -3,35) in das Feld prokonnesischer Marmore, aber sowohl die Petrographie als auch die geochemischen Kennwerte korrespondieren ansonsten mit den Wunsiedelproben (Fe 178-583 ppm, Mn 15-47 ppm, Sr 165-182 ppm, $\Sigma SEE/Y$ um 3, Ce_{neg} 0,7-0,9, Y/Ho 63-79, s. Abbildung 239); die niedrigen Mg-Gehalte zwischen 0,19-0,25

Gew% weisen auf die Abwesenheit von Dolomit in den Proben hin. HECHT *et al.* (1999) geben für unveränderte Wunsiedel- Calcitmarmore (Cc1 in 2-4 km Entfernung von der Talklagerstätte Göpfersgrün) teilweise von den jetzt untersuchten Proben abweichende Merkmale an: oft mit Dolomitlagen, Korngrößen 1-4 mm, unregelmäßige Korngrenzen, sehr feinkörnige Dolomitausfällungen; niedrige SEE-Gehalte und negative Cer-Anomalie als Indiz für einen in mariner Umgebung gebildeten Protolithen, δC zwischen -1,5 bis +2, δO_{SMOW} 14,3 bis 18,1 (= δO_{PDB} -16,1 - -12,4). Zwar wird durch diese Angaben die Kohlenstoffisotopie der Museumsprobe abgedeckt, aber weder ihre Sauerstoffisotopie (-3,34) noch die der eigenen Wunsiedelproben (-9,68 bis -6,76). Bei Betrachtung der Werte einer der drei unalterierten Calcitproben (WunsHecht1264 in Abbildung 239) zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung insbesondere mit den Werten der modernen Ergänzung: das wie bei uns mittels ICP-MS ermittelte SEE-Verteilungsmuster ist fast identisch; zwar ist die negative Cer-Anomalie viel schwächer ausgeprägt als bei den Marmaraproben, aber doch vorhanden, ebenso bewirkt die relative Y-Verarmung einen übereinstimmenden $\Sigma SEE/Y$ -Wert von 3,2 ($Y/Ho = 68$). Die mittels RFA ermittelten Gehalte an Fe (699 ppm), Mn (62 ppm) und Mg (0,77 Gew%) sind außer bei Mg in der gleichen Größenordnung, was bei Sr = 213 ppm ein ebenfalls übereinstimmendes Fe/Sr-Verhältnis von 3,2 ergibt.

Die Abweichungen in der Isotopie zeigen lediglich, dass auch HECHT *et al.* (1999) das Merkmalspektrum von Wunsiedelmarmoren nicht vollständig erfasst haben, was allerdings auch nicht ihr Anliegen war. Sie wollten untersuchen, wie sich in der Nähe von dolomitischen Lagen und der aus ihnen hydrothermal entstandenen Talklagerstätte Göpfersgrün das umgebende Calcitmarmor-Ausgangsgestein⁶⁷ verändert hatte. Jedenfalls bestätigen deren Ergebnisse nicht nur die hohe Signifikanz und Reproduzierbarkeit geochemischer Daten zur Lagerstättencharakterisierung, sondern auch, dass der schon für die Stadtmauer von Wunsiedel verwendete Marmor seinen Weg in die Hände von Restauratoren der Berliner Antikensammlung gefunden hatte.

⁶⁷ Es soll im Kambrium gebildet worden sein (WASSERWIRTSCHAFTSAMT BAYREUTH 2004)

7 Charakterisierung und Herkunftsbestimmung der antiken Marmorartefakte im geologischen und archäologischen Kontext

In Tabelle 8 auf S. 50 (s. auch Übersichtskarten in Abbildung 16 und Abbildung 17 auf S. 51) erfolgte bereits eine Zusammenstellung der beobachteten Werksteine in den antiken Stätten und einiger Merkmale der Marmorlagerstätten. In der folgenden Tabelle 29 werden Merkmalsbündel der meist aus der Antikensammlung stammenden antiken Objekte mit korrespondierenden Marmorlagerstätten korreliert und eine Gesamtzuordnung vorgenommen. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der antiken Stätten und die detaillierte Diskussion der für die Provenienzanalyse der aus ihnen stammenden Museumsobjekte relevanten Merkmale.

Für die Zuordnung wurde neben Literaturangaben vor allem auf den beträchtlichen Bestand an eigenen Messdaten zurückgegriffen. Eine erste Vorsortierung erfolgte anhand petrographischer Merkmale und Dünnschliffaufnahmen. Die in Excel- und SPSS-Dateien eingegebenen petrographischen, geochemischen und isotopischen Daten der Museumsobjekte wurden mit den Datenreihen, Elementverhältnissen und –korrelationen, bivariaten Diagrammen der Lagerstätten sowie Literaturangaben verglichen. Diese breite Datenbasis schuf die Voraussetzung für die Erstellung des in Kapitel 8 vorgestellten Herkunftsdiagnosesystems „Marbexpert“.

Für die Herkunftsbestimmung muss die Signifikanz von Einzelwerten sinnvoll berücksichtigt werden (s. besonders Kapitel 5.4). So sind bei der Kohlenstoffisotopie hohe δC -Werte signifikanter als mittlere, die denen der meisten Lagerstätten entsprechen. Hohe Mn- und Fe-Gehalte können „Ausreißer“ sein, aber auch auf Lagerstätten wie Penteli hinweisen. In Zweifelsfällen kann der direkte Vergleich im Handstück den Ausschlag geben. Mittels nachträglicher Clusteranalyse (Kapitel 5.2) konnten sämtliche prokonnesischen Marmore gemeinsam gruppiert werden, wobei nur wenige nichtprokonnesische Marmore interferierten. Für die anderen Marmore ergab sich jedoch nicht zuletzt wegen ihrer vergleichsweise geringen Probenanzahl kein statistisch aussagekräftiges Bild. Die nachträgliche Diskriminanzanalyse (Kapitel 5.3) bestätigte fast alle Zuordnungen und tauschte lediglich einige den Brüchen von Herakleia und Milet West zugeordnete Objekte untereinander aus. Insgesamt erwies sich eine Herkunftsbestimmung anhand von Einzelmerkmalen oder am „Grünen Tisch“ ohne direkten Bezug zum Geomaterial als ungeeignet.

In einigen Fällen wird der Werdegang der Herkunftsbestimmung detailliert beschrieben, insbesondere wenn speziellere archäologisch-archäometrische Fragen oder die Überlappung von Merkmalen dies als sinnvoll erscheinen lassen. In anderen Fällen ist eine summarische Beschreibung ausreichend.

7.1 Multivariate Zuordnungstabelle antiker Objekte zu Marmorlagerstätten

In Tabelle 29 sind relevante Merkmalsmuster sämtlicher antiken Objekte denjenigen Lagerstätten zugeordnet, mit denen sie die beste Übereinstimmung zeigen. In Tabelle 30 wird eine Auswahl relevanter Einzelmerkmale der Artefakte ebenfalls in Vergleich zu Lagerstätten gesetzt, hier allerdings aus Gründen der Übersichtlichkeit ohne die antiken Objekte aus Pergamon. Letztere werden am Anfang des Pergamonkapitels (7.7.5) tabellarisch zusammengefasst.

Probenart und –herkunft	Petrographie	Isotopie	SEE	Chemismus (Mn, Fe, Sr, Mg, Ba)	Sonstige	Zuordnung
Myus (My)						
My1) Mantelträger (Sk 1664) 6. Jh.v.u.Z	DS n.a.	= Di3, MTW	MTW	Di3, My2, MTW, ParWMT		wie archaischer Kouros von Didyma, Milet West?
My2) Gelagerter (Hermonax; Sk 1673) 6. Jh.v.u.Z	DS n.a. makroskop: Pent	NxFI, Pent, Pri, Thes	Pent (Lon1) MyLS3?, MilasWp10	Pent (aber>Mn), Thes		?, Penteli, aber archäolo- gisch unwahrscheinlich
My3) Wagenrennen-Fries (Sk 1665/6) 6. Jh.v.u.Z Arch. Säulenfragm, Kapitell (Inv.My 1.4) 6. Jh.v.u.Z	MyLS28	MyLS28	MyLS28	MyLS28		MyLS28 = Lagerstätte bei Myus
Didyma (Di)						
Di1) Frauenkopf einer Columna Caelata (arch. Apollontempel, Sk 1747) 6. Jh.v.u.Z	MyLS28 MTW	MyLS28 Afr, Pri4, MTW, Nx	MyLS28 Pri4	MyLS28, MTW, MTO, Par, Afr		MyLS28 = Lagerstätte bei Myus
Di2) arch. Säulenfragmente (Apollontempel, ion. Kapi- tellfragm. Sk 1818) 6. Jh.v.u.Z	MT-W, MT-O	Hk, MTW MTO, Mugla	MTW, Mugla	MTW, Mugla Hk- Buçak		Milet West
Di3) arch. Kouros (Sk 1749) 6. Jh.v.u.Z	Groß, gelängt	My1, MTW, Pri MyLs Nx)	MTW, MyLS28	My1, MTW, My Pri, Par2		wie Myus Mantelträger, Milet West?
Di4) Frontsäule Dodekastylus	Thasos	Thasos	Thasos	Thasos		Thasos-Aliki
Di5) Naiskos Apollontempel (Antenkapitell), 3. Jh.v.u.Z	MTW, (Hk)	Hk, Pa, MTW2, Afro, Mug, Eur	Hk MTW2, MTO	Hk, MTW2, Mugla		Milet West, Antenkapitell = Architravfragmente
Di6) Steingarten a. N-Seite, (Werkpl., unterh. 6. Säule v. E)	MT-O	MTO	MTO	MTO, MTW, Afro		Milet Ost
Milet (Mi)						
Mi1) Delphinion-Altar: Voluten ionisches Kyma (6. Jh.v.u.Z) Deckplattenecke	Pri4, MyLS28	Pri4, MyLS28, (Nx, Usak), MTW	MyLS28, Pri4, MTW	MyLS28, Pri4, MTW		Gleicher Marmor, wie My3, MyLS28?
Mi2) Rankenpfeiler vom Nymphäum 2. Jh.n.u.Z	Hk	Hk, Di5, BG, Di2, Afro, Milas	MT, Afr5, Mil, Hk, Di2, Mug	Hk, MTW Di2, Di5, Mugla, Afro5, Milas		Herakleia
Mi3) Rathaus (Schildakroter) 2. Jh.v.u.Z	Hk, MTW	Mi5, Hk, MTW, Par2	Mi5, Hk(Buc), MTO	Mi5, MTO, MTW		Milet West
Mi4) Marktort Architekturfragm: Säulenkerne, 2. Jh.n.u.Z	Hk	Hk	Hk	Hk		Herakleia
Mi5) Faustinathermen, Diony- sos und Satyr (Sk1797) 2. Jh.n.u.Z	Milet, ParWMT	Hk, MTW, Milas	MTW	Hk, MTO, MTW, Mi1, MyLS28		Milet West
Magnesia/Mäander (Mg)						
Architekturfragmente vom hellenist. Artemistempel 2. Jh.v.u.Z	MgLS	MgLS, Ef-Bel	MgLS	MgLS		LS 20 km N Magnesia (LS-Proben von Ch. Kronewirth)
Relieffrag, Artemisaltar 2. Jh.v.u.Z	MT	MT, Afro, Milas	MTW6	MT, Afro		Hk, Milet West?
Hellenistische und römische Großprojekte in Pergamon						
Meist lokal anstehend Andesit, untergeordnet Trachyt, Kozak-Granodiorit, Marmore vorwiegend von Marmara, Ephesos (homog. Korngefüge, oft Dolomitführend), Lesbos Moria (dunkle Marmore, oft mit Megalodonten), untergeordnet Hymettos, Thasos-Aliki, evtl. Naxos						
Gebälk Dionysostempel Theaterterrasse (2. Jh.v.u.Z)	Ef-Bel	Ef-Bel-Ayt, Pent, Paros	Ef-Bel-Ayt.	Ef-Bel-Ayt		Ephesos-Belevi-Aytekin,
Tempel Oberer Markt (hellen.) 2. Jh.v.u.Z	Mm	Mm	Mm	Mm		Marmara
Pergamonaltar(Großer Fries) 2. Jh.v.u.Z	Mm	Mm (40x)	Mm	Mm (25x)	CL+ESR=Mm	Marmara Sockel tw. Lesbos-Moria
Moderne Ergänzungen						
GF109E	Car	Car	(Car)	Car		Carrara
GF111E	Wuns	Mm	Wuns	Wuns		Wunsiedel
GF106E	Mm	Mm	Mm	Mm		Marmara
Telephosfries 2. Jh.v.u.Z	Mm	Mm(26x) 2 Cluster	Mm (24x)	Mm (24x)	CL=Mm ESR=Mm+MT	Marmara Weniger einheitl. als GF
Marmorsaal/ Waffenrelief	Hym, Pent	Hym, BG	Hym	Hym		Hymettos
Demetertempel (Fries Sk 1737a) 3. Jh.v.u.Z	Mm	Mm	Mm	Mm		Marmara
Oberes Gymnasion / Tempel R (hellenist. 2. Jh.v.u.Z)	Thas	Thas	Thas	Thas		Thasos-Aliki
Athenahallen, Waffenrelief 2. Jh.v.u.Z	Lesbos-Moria?- Doliana?	Lesbos-Moria Afro, Hym, BG, Ef, Dol, Par2	indifferent	ParWMT		Unbekannter lokaler Marmor? Lesbos-Moria?
Kouros (6. Jh.v.u.Z)	DS n.a.	Mm, BG, Par2	n.a.	n.a.		Marmara?
Sonst. Vergleichsproben						
Ilion-Troja: Athenatempel, Metope (Sch 9585) 3. Jh.v.u.Z	Mm	Mm	Mm	Mm		Marmara
Ephesos: Hafenthermen Kapitell-Fragment, 2. Jh.n.u.Z	Mm	Mm	Mm2	Mm	CL=Mm	Marmara
Athen: Eumeneshalle (Frag- ment v. M. Korres) 2. Jh.v.u.Z	Mm	Mm	(Mm)	Mm	sonst lok. Kalkstein u. fk gr. Marmor	Marmara
Priene: Athenatempel Anten- basis, 4. Jh.v.u.Z	Phourni	Phourni	Phourni	Phourni	beide Marmore gleich	Phourni-Insel Tempel meist lokaler M.
Samos: Heraion, Säulenfrag- mente vom 2. Dipteros, 6. Jh.v.u.Z	Phourni	Phourni	Phourni	Phourni		Phourni-Insel
Legende: Kursiv: Museumsproben, n.a.: nicht ausreichende Probenmenge, DS: Dünnschliff, SEE: Seltenerdelemente (Lanthanide), CL: Kathodolumi- neszenz, ESR: Elektrosinresonanzspektroskopie; Lagerstätten: Afr: Aphrodisias, BG: Bafa-See (Hk: Herakleia, MT-W, MT-O: Milet-West (Ost), MyLS28: Lagerstätte zwischen Myus und NW-Ufer Bafa-See), Car: Carrara, Ef: Ephesos, Hym: Hymettos, MgLS: Lagerstätte bei Magnesia/M, Mm: Marmara (=Prokonnesos), ParWMT: Paros Westl. Marmortal = Par2, Pent: Penteli, Pri: Priene, Wuns: Wunsiedel.						

Tabelle 29: Zuordnung aller antiken Objekte zu Lagerstätten nach geowissenschaftlichen Gesichtspunkten

(In Klammer Kapitel-Nr.)		Petrogr. MGS/AGS	ΣSEE (ppm)	ΣSEE/Y	Cer _{neg}	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Mg Gew%	Sr (ppm)	Fe/Sr	δ ¹⁸ O	δ ¹³ C	LS-ZO	
My1) (7.4.1) Mantelträger	Myus	Kein DS, mk.	7.6	0.9	0.24	123	9.8	0.13	143	0.86	-7.46 -7.31	.93 .94	MTW?	
			MTW			Di3, My2, MTW, ParWMT						Di3, MTW		
My2) (7.4.2) Gelagerter (Hermox)		Kein DS, fk, Patina Pent	1.8	1.5	0.64	158	13.8	0.67	192	0.82	-5.07 -5.03	2.54 2.55	Pent?? archäol. unwahrsch.	
			Pent, MyLS3?, MilasWp10			Pent (aber>Mn), Thes						NxFl, Pent, Pri, Thes		
My3) (7.4.3) Wagenrennen-Fries) Arch. Säulenfragm.		3-1.6/0.4 MyLS28	6.8 10.1	1.1 1.4	0.29 0.36	58 126	4.1 8.6	0.16 0.22	107 138	0.54 0.91	-5.89	1.61	MyLS28	
			MyLS28			MyLS28						MyLS28		
Di1) (7.5.1) Frauenkopf einer Columna Caelata		Didyma Apollontempel	2/0.4-0.9 KL MyLS28 MTW	12.2	1.1	0.23	45	4.4	0.11	117	0.38	-5.62 -5.47	1.59 1.68	MyLS28
				MyLS28 Pri4			MyLS28, MTW, MTO, Par, Afr						MyLS, Afr, Pri4, MT, Nx	
Di2) (7.5.2) Fragment Ion. Kapitel			1.6-1/0.5 MTW, MTO	0.2	1.6 1.8	0.88 0.98	13 20	5.4 6.2	0.18 0.24	45 61	0.29 0.32	-3.07	1.34	MTW
				MTW, Mugla			MTW, Mugla Hk-Buçak						Hk MT Mugla	
Di3) (7.5.3) Arch. Kouros	4-2/1-2 KL MT		5.4	1.1	0.31	107	9.8	0.36	123	0.87	-7.28 -7.24	0.64 0.72	MTW?	
			MTW, MyLS28			My1, MTW, My Pri, Par2						My1, MT, Pri MyLS Nx		
Di4) (7.5.4) Dodekastyllos	5.4-4/1.2-1.7 Thasos-Aliki		1.5	1.1	0.14	19	40.2	0.19	74	0.26	-0.61	3.12	Thasos-Aliki	
			Thasos-Aliki			Thasos-Aliki						Thasos-Aliki		
Di5) (7.5.5) Naiskos	2-1.6/1 MTW, (Hk)		0.1	1.2 2.3		15 16	3.7 5.8	0.09	45 54	0.30 0.34	-3.86 -3.65	1.73 1.83	Hk MTW	
			Hk MTW2, MTO			Hk, MTW2, Mugla						Pa, MT, Hk, Afr, Eu		
Di6) (7.5.6) Steingarten	1.2-1/0.5 MT-O	0.2	2.7		35	6.8	0.45	130	0.27	-2.23	2.16	MTO		
		MTO			MTO, MTW, Afro						MT-O			
Mi1) 7.3.2 Delphinion Volute	Milet	1.4-0.6/0.4-0.6 Pri4, MyLS28 MT	9.8	2.2	0.40	81	11.1	0.22	69	1.18	-6.01	2.44	MyLS28	
			7.7	2.2	0.49	71	5.8	0.17	70	1.00	-5.90	1.65		
			9.2	2.0	0.46	78	5.6	0.12	68	1.15	-5.74	1.74		
			MyLS28, Pri4, MTW			MyLS28, Pri4, MTW						Pri4, MyLS28, (Nx, Usak), MTW		
Mi2) (7.3.3) Rankenpfeiler vom Nymphäum		4.6-1.8/1-0.7 Hk	0.2	1.5		17	2.5	0.03	61	0.28	-3.4/ -3.3	2.12/2.25	Hk	
			MT, Afr5, Mil, Hk, Di2, Mug			Hk, MTW Di2, Di5, Mugla, Afro5, Milas						Hk, Di5, BG, Di2, Afro, Milas		
Mi3) (7.3.4) Rathaus (Schildakroter)		2.8-2.2/1.1-0.7 Hk, MTW	0.3	0.6	0.49	85	13.8	0.19	93	0.91	-3.09	1.77	MTW	
			Mi5, Hk(Buc), MTO, MTW			Mi5, MTO, MTW						Mi5, Hk, MTW, Par2		
Mi4) (7.3.1) Markttor Architekturfragm.		2.8-1.8/0.8 hom Hk	0.1 0.4	0.2 0.8	0.65	13 37	3.5 5.1	0.10 0.11	66/67	0.19 0.55	-3.7/ -3.47	1.46/1.78	Hk	
			Hk			Hk						Hk		
Mi5) (7.3.5) Faustina-thermen, Dionysos und Satyr	2.4-2.2/0.7-0.5 het Milet, ParWMT	0.3	0.7	0.27	57	5.3	0.18	92	0.62	-3.38	1.45	MTW		
		MTW			Hk, MTO, MTW, Mi1, MyLS28						Hk, MTW, Milas			

(In Klammer Kapitel-Nr.)		Petrogr. MGS/AGS	ΣSEE (ppm)	ΣSEE/Y	Cer _{neg}	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Mg Gew%	Sr (ppm)	Fe/Sr	δ ¹⁸ O	δ ¹³ C	LS-ZO
Altar	Magna Artemis Tempel	3-2.2/ 0.8 hom MT	0.2	3.2	0.91	34	14.8	0.13	111	0.31	-3.12	2.33/2.41	HK MTW?
Kapitell		2.4-0.8/ 0.2-0.8 het, dol	4.6	1.4	0.39	162	19.8	2.22	87	1.87	-5.43	4.02	MgLS Ef?
Sima	Magna Artemis Tempel	MgLS Ef	4.9	1.5	0.39	162	19.8	2.22	87	1.87	-5.26	4.09	
			2.4	0.9	0.21	16	3.9	0.19	71	0.11	-4.65	4.38	
			5.6	1.3	0.26	202	39.0	3.68	151	2.84	-4.25	4.74	
Priene Athena T		1-0.6/ 0.3-0.5 tw. KL, dol	4.6	1.7	0.46	281	11.9	0.37	112	2.52	-2.08	4.62	Phourni
Samos Heraion		Phourni	4.3	1.6	0.39	198	13.8	0.35	118	1.67	-2.24	4.31	
											-2.02	4.50	
Ephesos, Hafentherme		3.6-1./ 0.7 het, stinkt Prok	1.3	3.0	0.77	89	2.5	0.69	220	0.41	-2.59	2.49/2.69	Prokonnesos
Athen, Eumenes-Halle			2.1	1.9	0.34	88	5.5	0.30	126	0.70	-3.02	2.13	
Troja, Athena Tempel			1.4	0.9	0.37	19	7.8	0.30	183	0.10	-2.93	2.30	
											-0.50	2.84/2.88	

Tabelle 30: Bereich (min/max) von Messwerten und Merkmalen der Marmorartefakte (außer von Pergamon) mit einer Auswahl passender Lagerstätten: Afr: Aphrodisias, BG: Bafa Gölü (Hk: Herakleia, MTW, MTO: Milet West [Ost], MyLS28: Steinbruch zwischen Myus und NW-Ufer des Bafa-Sees), Car: Carrara, Ef: Ephesos, MgLS: Lagerstätte N von Magnesia/M, Mm: Marmara (=Prokonnesos), ParWmt: Paros Westliches Marmortal = Par2, Pent: Penteli, Pri: Priene. DS: Dünnschliff, fk, mk, gk: fein-, mittel-, grobkörnig, MGS aus drei größten Körnern, AGS parallel u. senkrecht zu evtl. Kornlängung KL (tw. mehrere DS)

7.2 Isotopie antiker Objekte vorwiegend aus der Mäandertalregion und von Pergamon - Erste Schlussfolgerungen

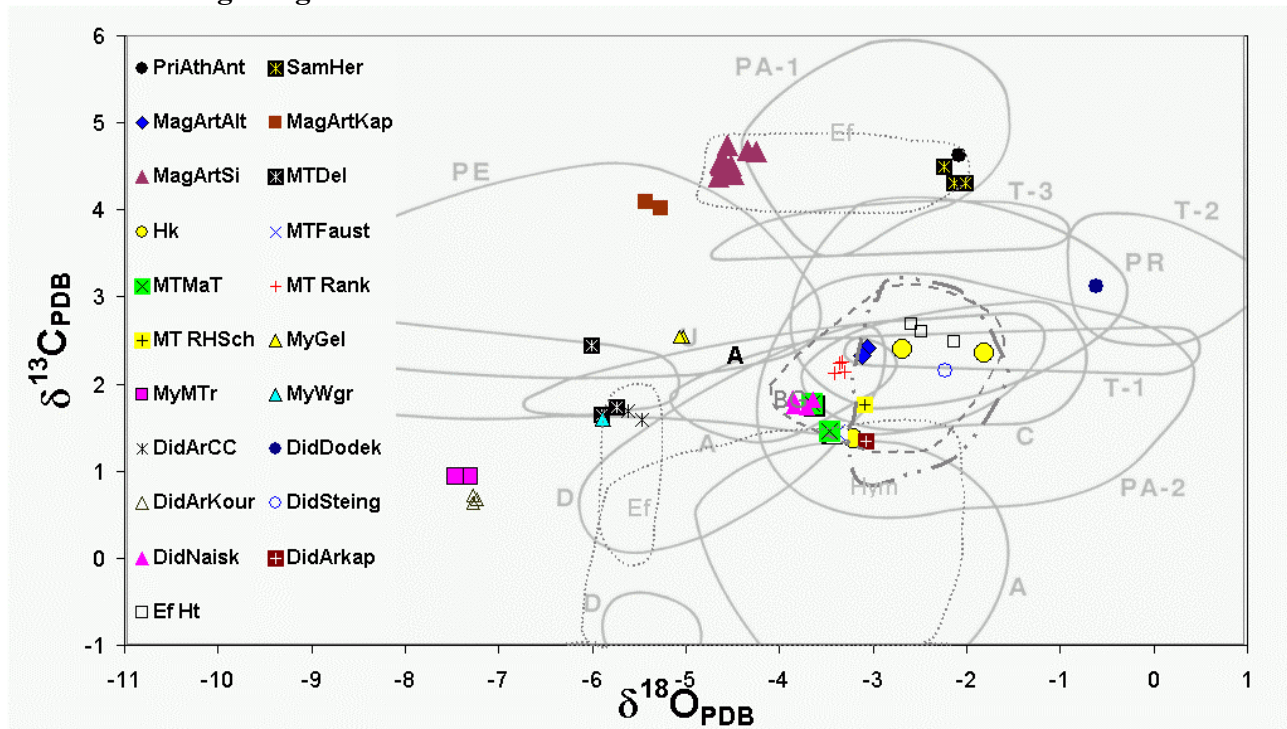


Abbildung 240: Isotopendiagramm antiker Objekte aus der Mäandertalregion (Erläuterung im Text) mit Feldern nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende s. Abbildung 13

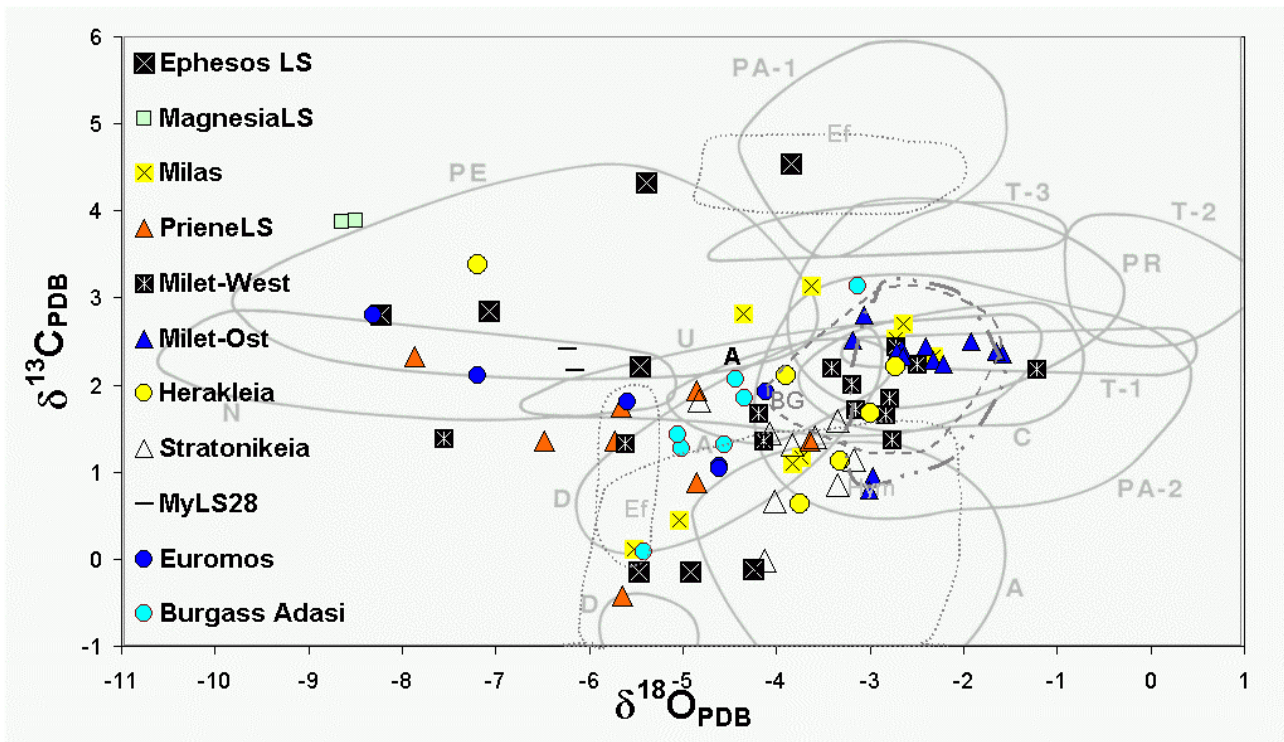


Abbildung 241: Isotopendiagramm von Marmorlagerstätten der Mäandertalregion mit Feldern nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende s. Abbildung 13

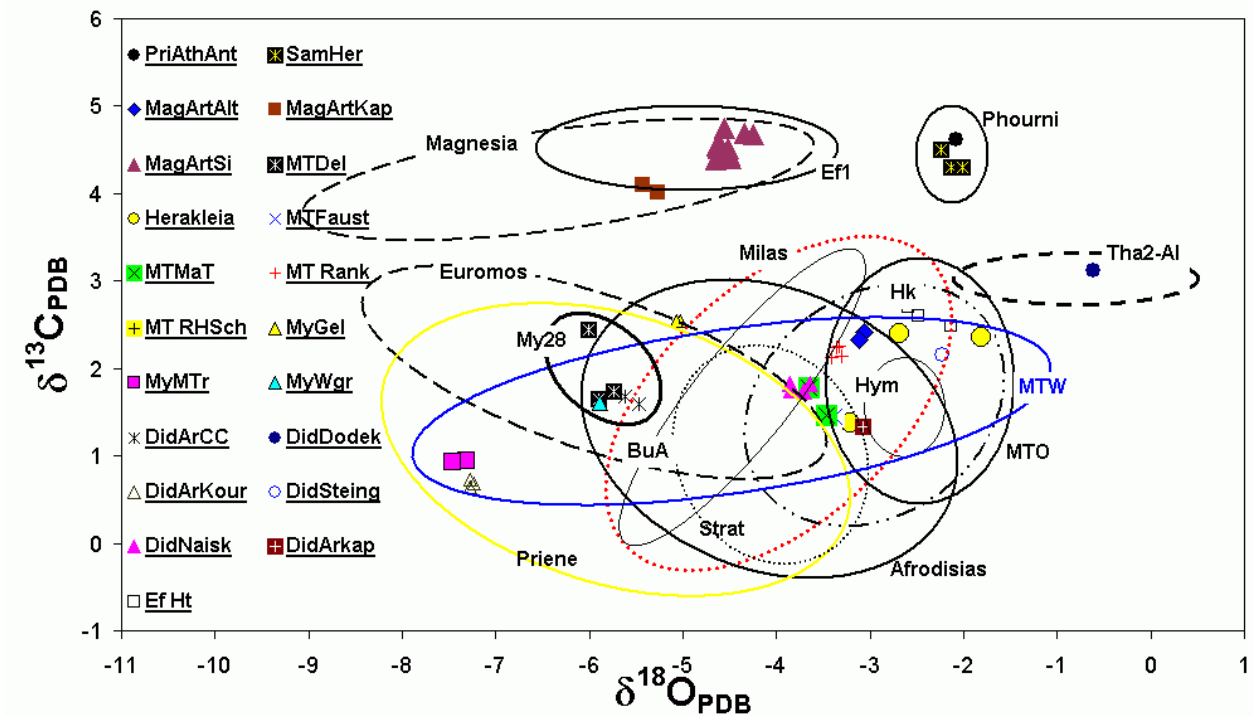


Abbildung 242: Isotopie antiker Objekte aus der Mäandertalregion mit aus Daten von Marmorlagerstätten und ihnen zugeordneten antiken Objekten konstruierten Isotopenfeldern, Lagerstättenlegende Abbildung 244

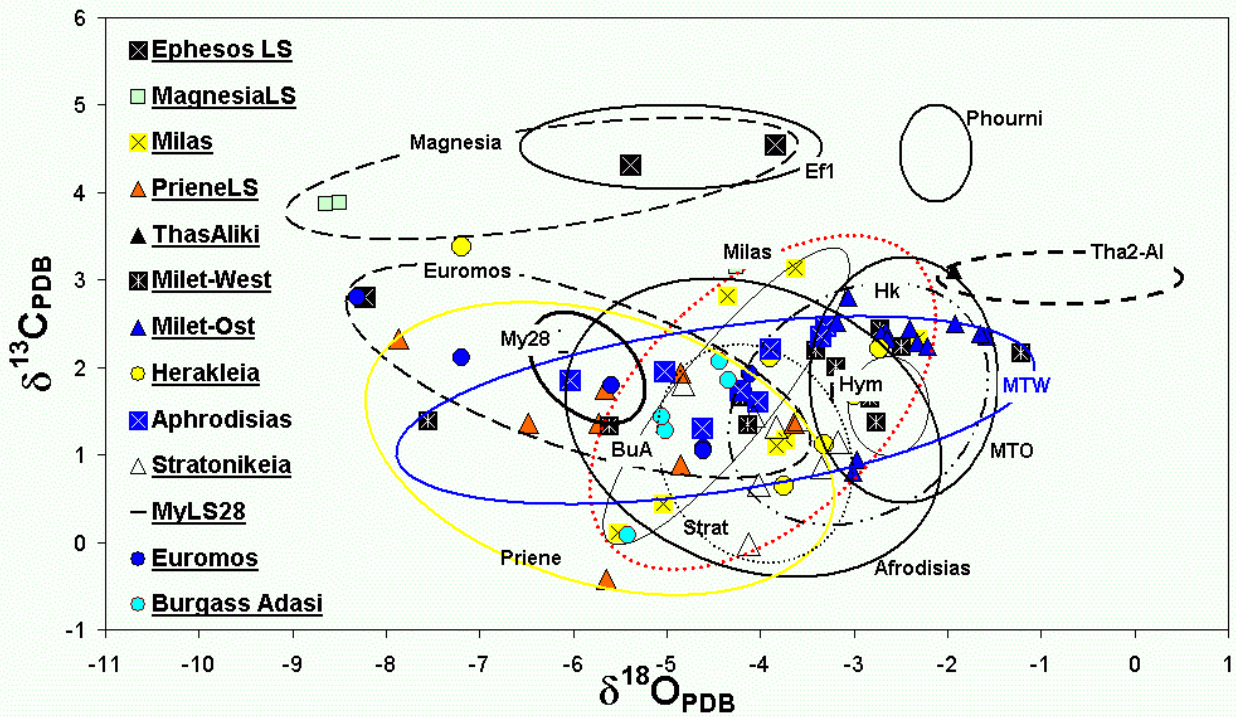


Abbildung 243: Isotopie von Marmorlagerstättenproben besonders aus der Mäandertalregion mit aus Daten von Lagerstätten und ihnen zugeordneten antiken Objekten erstellten Isotopenfeldern, Lagerstättenlegende s. Abbildung 244

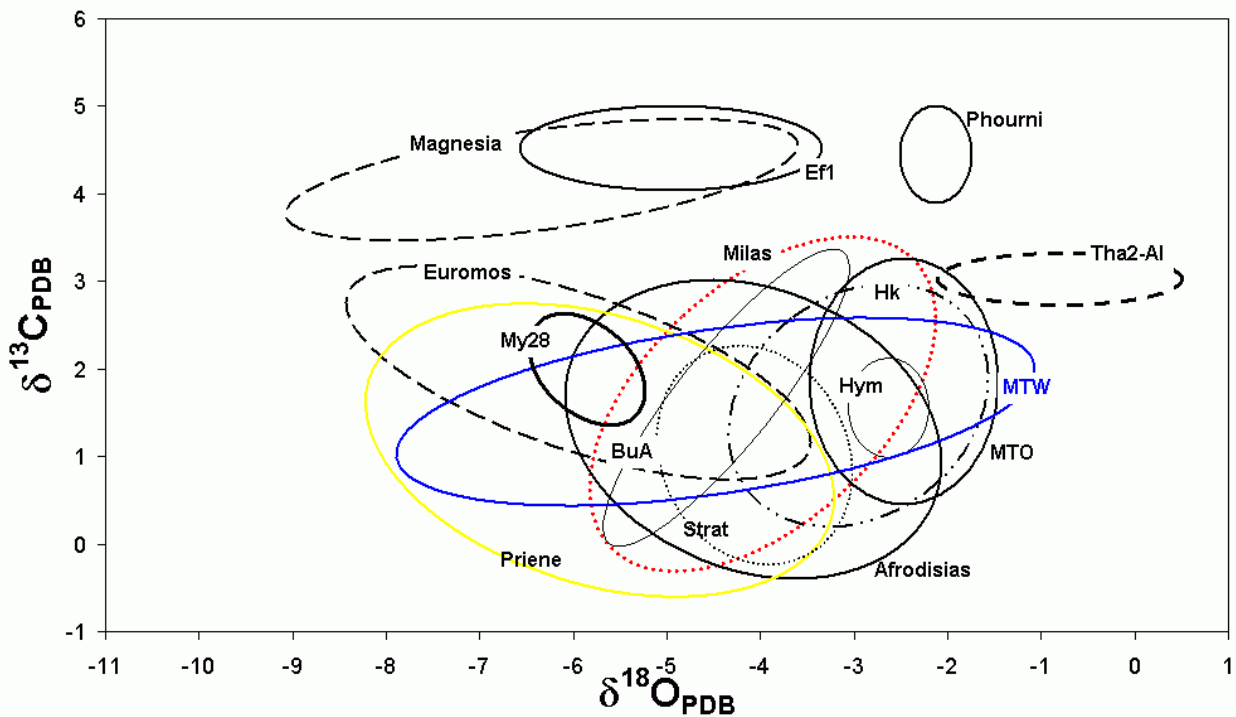


Abbildung 244: Aus Messwerten von Marmorlagerstätten und ihnen zugeordneten antiken Objekten vorwiegend der Mäandertalregion erstellte Isotopenfelder ohne Datenpunkte. Felder soweit nicht selbsterklärend: BuA: Burgass Adasi, Strat: Stratonikeia, Hk: Herakleia, MTO und MTW: Milet-Ost- und Westbrüche am Bafasee, My28: Marmorausbiß bei Myus, Ef1: Ephesos; klassische griechische Lagerstätten sind Hym: Hymettos und Tha2-AI: Thasos Aliki

Auf die Isotopiemesswerte der antiken Objekte wird bei deren Besprechung gegebenenfalls im Detail eingegangen. Hier soll ein grober Überblick genügen. In Abbildung 240 – Abbildung

244 sind die Isotopendaten von antiken Objekten und Marmorlagerstätten vorwiegend der Mäandertalregion dargestellt, einmal mit den Isotopenfeldern nach MOENS *et al.* (1992) und

HERZ (1987), anschließend mit aus eigenen Daten von Marmorlagerstätten und ihnen zugeordneten antiken Objekten konstruierten Isotopenfeldern. Abbildung 245 und Abbildung 246 zeigen in die Felder nach MOENS *et al.* (1992) und HERZ (1987) eingetragene Isotopendaten pergamenischer Marmorobjekte, wobei die zahlreichen prokonnesischen Proben besonders des Pergamonaltars aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 246 zusammengefasst sind.

Zur Erläuterung im Einzelnen: Ein großer Teil der Sauerstoff-Kohlenstoffisotopie der antiken Objekte aus der Mäandertalregion fällt in das für die Bafa-See-Steinbrüche (BG) schon früher ermittelte Isotopenfeld (HERZ 1987). Tatsächlich ist dieses jedoch weit größer und überlappt mit den Feldern vieler klassischer und hier untersuchter westanatolischer Marmorlagerstätten (s. Abbildung 244). Allerdings treten einige aussagekräftige Abweichungen auf. Oben rechts lassen die Messwerte der Antenbasis der Athenhalle von Priene (PriAthAnt) und des Herai-ons von Samos (SamHer) eine gemeinsame Herkunft – von den Phourni-Inseln – vermuten, was auch durch den petrographischen und geochemischen Befund gestützt wird. Links davon zeigen bei ebenfalls hohen δC -Werten die Marmore des Kapitells (MagArtKap) und der Sima (MagArtSi) des Artemisions von Magnesia am Mäander ähnliche Werte wie ein Teil der Marmore von Brüchen bei Ephesos (s. Dionysostempel in Abbildung 245). Marmor aus einem dolomitreichen antiken Steinbruch 20 km nördlich von Magnesia besitzt allerdings ähnlich hohe δC -Messwerte und stimmt auch petrographisch und geochemisch vorzüglich überein. Anzumerken ist, dass die Lagerstätten von Ephesos und bei Magnesia geologisch eng verwandt sind. Demgegenüber zeigt der Altar des Artemisions (MagArtAlt) eine deutliche isotopische, petrographische und geochemische Kongruenz mit den Milet-West-Steinbrüchen am Bafa-See. Keiner der Marmore mit hoher

Kohlenstoff-Isotopie ähnelt petrographisch dem parischen Lychnites (PA-1).

Der Marmor der Frontsäule des Dodekastylos von Didyma (DidDodek) überlappt isotopisch mit dem Prokonnesos- und Thasos-Aliki-Feld, ist jedoch wegen seiner Petrographie (besonders die Grobkörnigkeit) und Geochemie eindeutig den Brüchen von Thasos-Aliki zuzuordnen. Links unten zeigen die Werte des Mantelträgers von Myus (MyMtr) und des archaische Kouros von Didyma (DidArKour) ebenfalls eine Zusammengehörigkeit an, die auch vom geochemischen Befund gedeckt wird. Petrographisch und geochemisch ist eine Übereinstimmung mit den Brüchen am Bafa-See feststellbar. Insbesondere bei Proben der westlichen Brüche (MTW) am Südostufer des Bafa-Sees vor Kahve Adasi findet sich eine ähnliche Verarmung der Sauerstoffisotopie.

Dass Kyma, Volute und Deckplatte des Delphinions in Milet (MTDel) aus einem gemeinsamen Marmor bestehen, kommt auch isotopisch zum Ausdruck; einer seiner Messwerte überdeckt den des Wagenrennenfrieses von Myus (MyWgr). Rechts daneben befinden sich zwei Messwerte der archaischen Columna Caelata von Didyma (DidArCC). Alle drei antiken Objektgruppen stimmen zudem petrographisch sowie geochemisch ausgezeichnet mit Proben eines Steinbruchs bei Myus (MyLS28) überein. Trotz der isotopischen Überlappung lässt sich keine Ähnlichkeit mit Marmoren von Naxos, Penteli, Ephesos oder Uşak feststellen. Anders die Probe des Gelagerten von Myus (MyGel), deren beide fast identische Isotopiemesswerte deutlich in das Penteli-Feld fallen. Sie zeigt auch geochemisch und vom äußeren Befund her (für einen Dünnschliff lag nicht genug Probenmaterial vor) eine gute Übereinstimmung mit pentelischen Marmoren. Jedoch wird die Möglichkeit einer pentelischen Herkunft dieser aus dem 6. Jh. v.u.Z. stammenden archaischen Skulptur von archäologischer Seite bezweifelt.

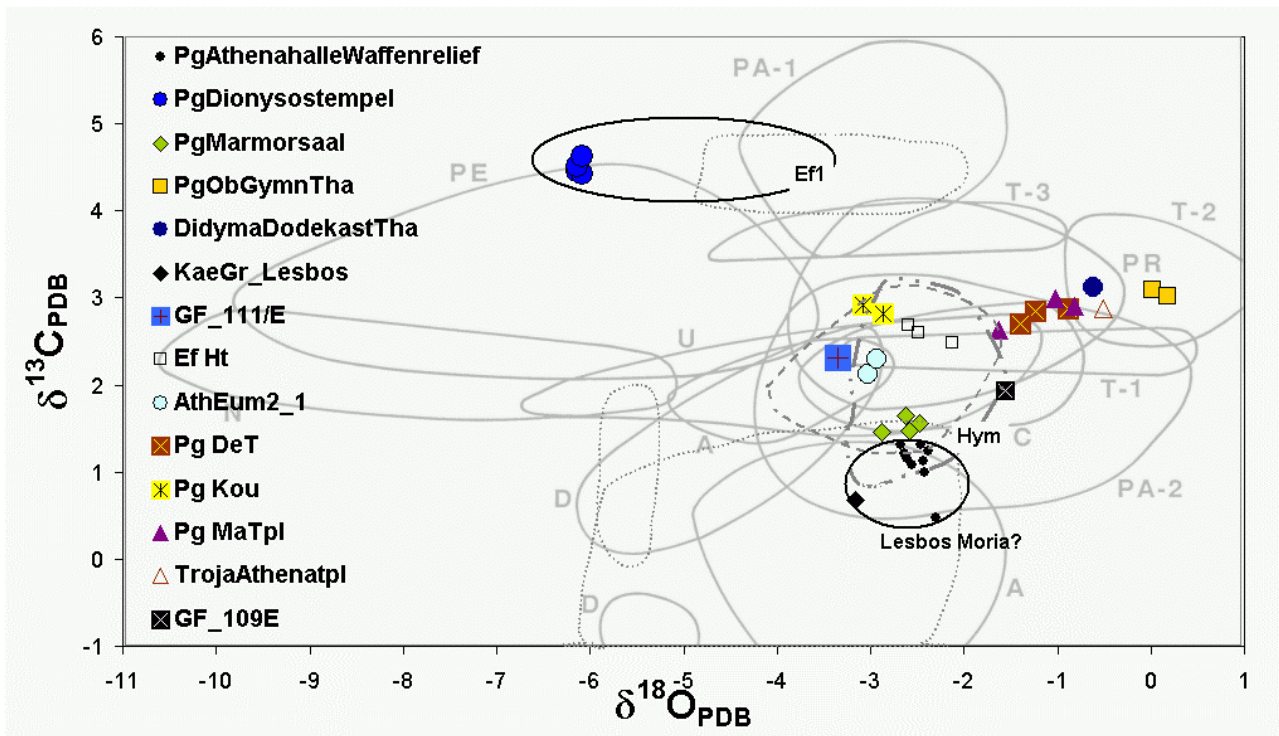


Abbildung 245: Isotopie antiker Objekte und Lagerstättenzuordnung aus Pergamon ohne prokonnesische Marmore des Pergamonaltars (Dionysostempel [Ephesos], Marmorsaal [Hymettos], Tempel R am Oberen Gymnasion [Thasos Aliki wie auch Frontsäule des Dodekastylos in Didyma], Athenahalle Waffenrelief und grauer Marmor KaeGr vom Pergamonaltar [Lesbos?], Demetertertempel, Kouros, Markttempel [Marmara], Restaurationsergänzungen am Großen Fries GF109E [Carrara] und GF111E [Wunsiedel]), Athen Eumeneshalle, Ephesos Hafentherme und Troja Athenatempel [alle Marmara]. Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende s. Abbildung 13

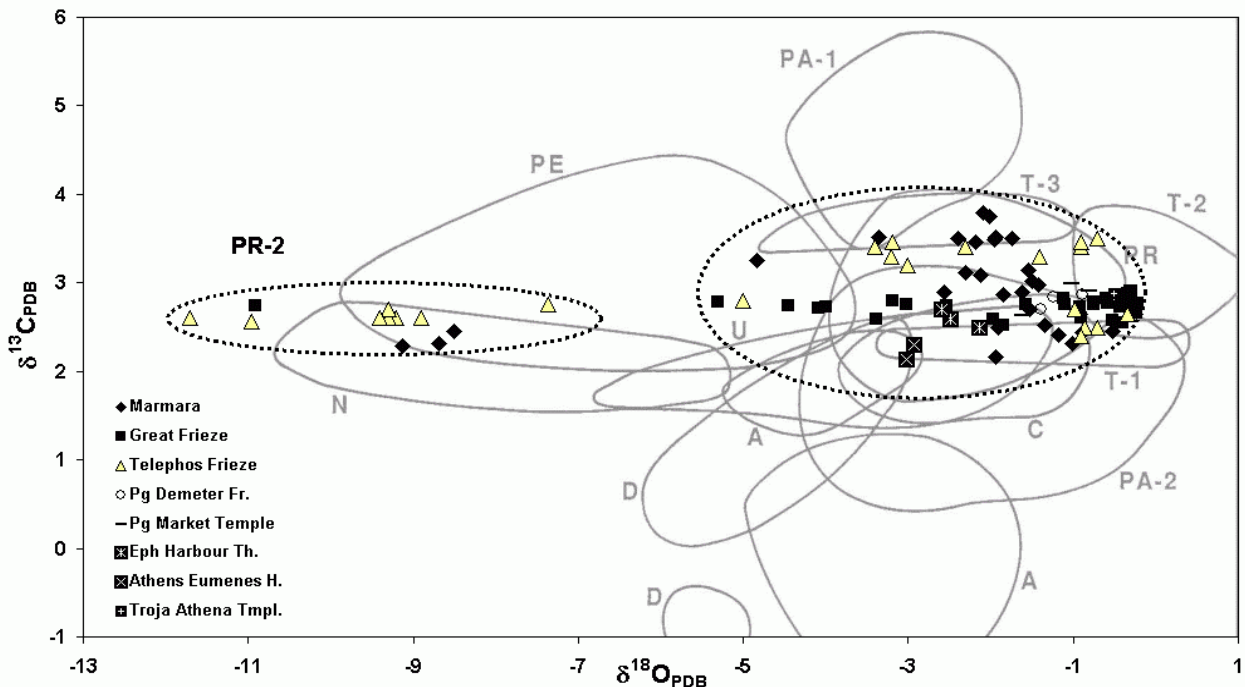


Abbildung 246: Isotopie antiker Objekte und Steinbruchproben prokonnesischer Provenienz mit erweitertem klassischem Isotopenfeld PR und dem neuen Feld PR-2, eingetragen in Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987). Lagerstättenlegende s. Abbildung 13. Man beachte die notwendige Erweiterung von δO bis -13

Abbildung 245 gibt die Isotopie weiterer antiker Objekte wieder, hauptsächlich aus Pergamon, daneben Proben pentelischer Herkunft und von

Athen, Ephesos und Troja. Einige erscheinen noch einmal in Abbildung 246, in der sämtliche antiken Objekte aus prokonnesischen Marmoren

sowie Steinbruchproben von Marmara gemeinsam wiedergegeben werden (s. Kapitel 6.3). Die meisten Proben aus Pergamon weisen isotopische und sonstige Merkmale prokonnesischer Marmore auf (Großer Fries und Telephosfries des Zeusaltars, Demetertempel, Tempel Oberer Markt). Da sich am archaischen Kouros mit ebenfalls prokonnesischer Isotopensignatur wegen geringer Probenmengen keine zusätzlichen Untersuchungen vornehmen ließen, bedarf eine eindeutige prokonnesische Zuordnung weiterer Untersuchungen. Nichtprokonnesischer Herkunft in Pergamon sind die Proben vom Dionysostempels (ephesischer Marmor), Waffenrelief des Marmorsaals (Hymettos), Tempel R (PgAKTha –Thasos-Aliki) und ein grauer Marmor vom Sockel des Pergamonaltars (KaeGr – wahrscheinlich Lesbos Moria). Das Waffenrelief des Athenatempels kann nicht zugeordnet werden, der gräuliche Farbton und die Nähe zum Isotopenfeld von Lesbos Moria lässt ebenfalls eine Herkunft von der vorgelagerten Insel annehmen. Eine moderne Ergänzung des Pergamonaltars besteht aus Carrara-Marmor (GF109_Car), eine weitere (GF_111/E) weist eine gute Übereinstimmung mit Marmorproben aus Wunsiedel auf.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in einigen Fällen die Sauerstoff-Kohlenstoff-Isotopie sehr wertvolle Hinweise für die Provenienzbestimmung der Mäandertal- und Pergamonobjekte liefert. Die Abweichungen der Isotopiemesswerte innerhalb einer Objektgruppe bewegen sich im Rahmen der natürlichen Schwankungsbreite in einem Gesteinblock und sind damit zugleich ein Beleg für die gute Reproduzierbarkeit der Messwerte.

7.3 Milet

Die Gründungsgeschichte von Milet lässt sich bis in das 2. Jahrtausend v.u.Z. zurückverfolgen (BAYHAN 2000). Seit dem 7. Jahrhundert entwickelte es sich zu einem Knotenpunkt Ioniens, wobei sein Hafen die Grundlage für Schifffahrt, Reichtum durch Handel und Siedlungsbewegungen bis nach Ägypten und an das Schwarze Meer schuf. Wegen seiner Beteiligung am Ionischen Aufstand nach der Schlacht von Lade 494 von den Persern zerstört, wurde es nach den Plänen von Hippodamos neu aufgebaut. Nicht

zuletzt aufgrund der Verlandung und Versumpfung des Menderes-Flussdeltas verlor es unter römischer Oberherrschaft seit dem 3. Jh. u.Z. seine Rolle und wurde faktisch aufgegeben. In byzantinischer Zeit erfuhr es eine kurze Renaissance, ebenso als Teil des Menteşe-Fürstentums unter Ilyas Bey. Aus Milet wurde Palatia, schließlich Balat. Im 17. Jh. wird der Ort ganz aufgegeben. Häufige Wechsel von Zerstörungen und Neubesiedlungen erschweren die Rekonstruktion der alten, auf Hippodamos zurückgehenden gitterförmigen Stadtanlage (Abbildung 249), in der seit 1899 zunächst unter Leitung von Th. Wiegand systematische Ausgrabungen stattfinden. Verschiedene geborgene Stücke befinden sich aufgrund von Fundteilungen heute im Berliner Museum.

Ähnlich wie in Didyma (BORG & BORG 1998, 2002b) besteht der Untergrund von Milet in erster Linie aus neogenen Kalksteinen, was sich sehr gut an der Nekropole beim heutigen Balat beobachten lässt (Abbildung 250). Dieser wurde vorwiegend für Fundamente eingesetzt, ebenso wie Glimmerschiefer (wahrscheinlich aus der Schieferhülle des Mendereskomplexes) und Gneise. Für letztere wurden zwei Steinbrüche bei Myus als Bezugsquelle für die Errichtung der 8 km langen Stadtmauer ermittelt (SCHRÖDER & YALÇIN 1991). Es ist naheliegend, dass antike Marmorsteinbrüche bei Myus am NW-Ufer des Bafa-Sees, die von beiden Autoren erwähnt werden, auch einen Teil des in Milet verwendeten Marmors lieferten. Dies kann durch die Übereinstimmung unseres Probenmaterial aus diesem Gebiet mit antiken Objekten aus Myus, Didyma und Milet nun als gesichert angesehen werden.

Die Hauptmenge des in Milet und Didyma verwendeten Marmors lässt sich jedoch den Brüchen von Herakleia und den „Milet-Brüchen“ am Südostufer des Bafa-Sees (s. Karte Abbildung 144) zuordnen (GERMANN 1981; PESCHLOW-BINDOKAT 1981), während Phourni-Marmore nicht nachweisbar sind. Daneben finden sich an einer Löwenskulptur (Abbildung 248) im Museum von Milet sowie an der Fassade des römischen Theaters (Abbildung 247) deutliche äußere Merkmale, die auf die Verwendung prokonnesischer Marmore hindeuten.



Abbildung 247: Gebänderter Marmor am römischen Theater von Milet, evtl. Marmara

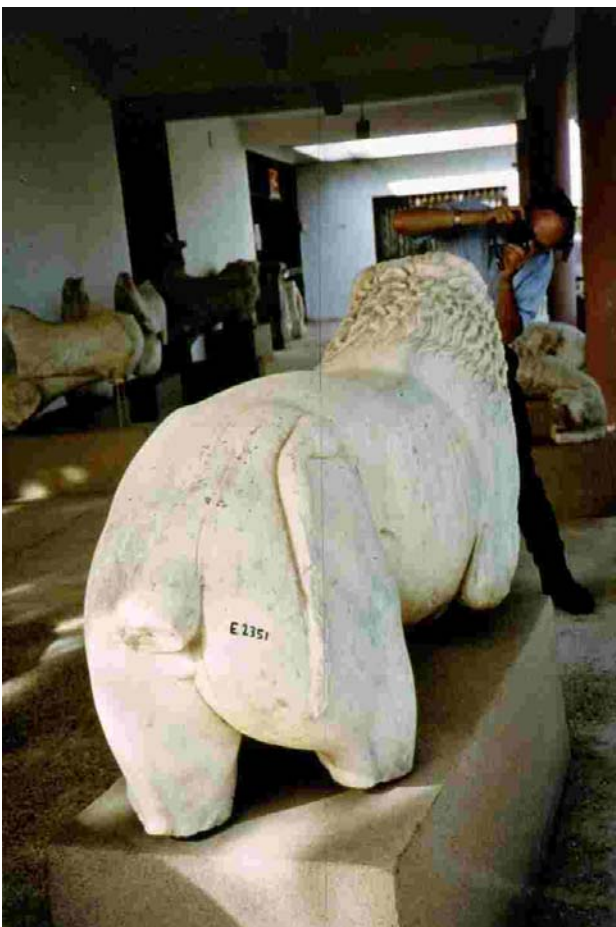


Abbildung 248: Löwe im Museum von Milet mit dunkler Bänderung, evtl. aus prokonnesischem Marmor

Anders als in Didyma ist die Verwendung thasischer Marmore in Milet bisher nicht nachweisbar; eine endgültige Antwort kann aber erst eine systematischere Untersuchung ergeben. Vereinzelt wurden auch Hangschuttbrekzien verbaut. Im Bereich der alten Hafenanlage von Milet verstreut liegen mehrere behauene Blöcke aus rötlichem Andesit, der sich äußerlich nicht von dem in Pergamon anstehendem vulkanischem

Gestein unterscheidet, das dort den vorherrschenden Werkstein lieferte (s. Kapitel 7.7.2).



Quelle: BRÜCKNER 1996, Abb. 2

Abbildung 249: Stadtplan des antiken Milets (BRÜCKNER 1999)

Die Beziehung beider Städte hat mindestens seit dem pergamenischen Herrscher Eumenes II bestanden, der in Milet ein Gymnasion und ein Stadion stiftete. Seit der römischen Kaiserzeit spielen Baustiftungen in Milet eine große Rolle, so dass die Verwendung von Baumaterialien aus überregionalen kaiserlichen Brüchen für diese wichtige Stadt nicht verwundern kann.

Ein grobkörnig weißes Marmorfragment der Byzantinischen Kirche beim Nymphäum lässt sich nach äußeren Merkmalen unzweifelhaft als der selbe mittel-grobkörnige Marmor ansprechen, wie er für das unmittelbar südlich anschließende Markttor von Milet verwendet wurde, der aus Herakleia-Marmoren errichtet wurde. Im Rahmen dieser Arbeit kann allerdings nicht entschieden werden, ob es sich dabei um wiederverwendeten Marmor (des Markttors?) handelt oder ob die Herakleia-Brüche in byzantinischer Zeit noch im Abbau standen.



Abbildung 250: In neogene Kalksteinhorizonte eingegrabene Nekropole bei Balat von außen und innen

7.3.1 Mi4) Markttor von Milet, Architekturfragmente (ZO Herakleia)⁶⁸

Große Teile des um 120 u.Z. errichteten Markttors von Milets befinden sich seit 1908 im Berliner Museum, wo sie seit 1930 eines der eindrucksvollsten Ensembles bilden (Abbildung 251 oben). Die Säulen wurden ausgebohrt; mit den im Kellerarchiv gelagerten Bohrkernen (Abbildung 251 unten) stand ausreichendes

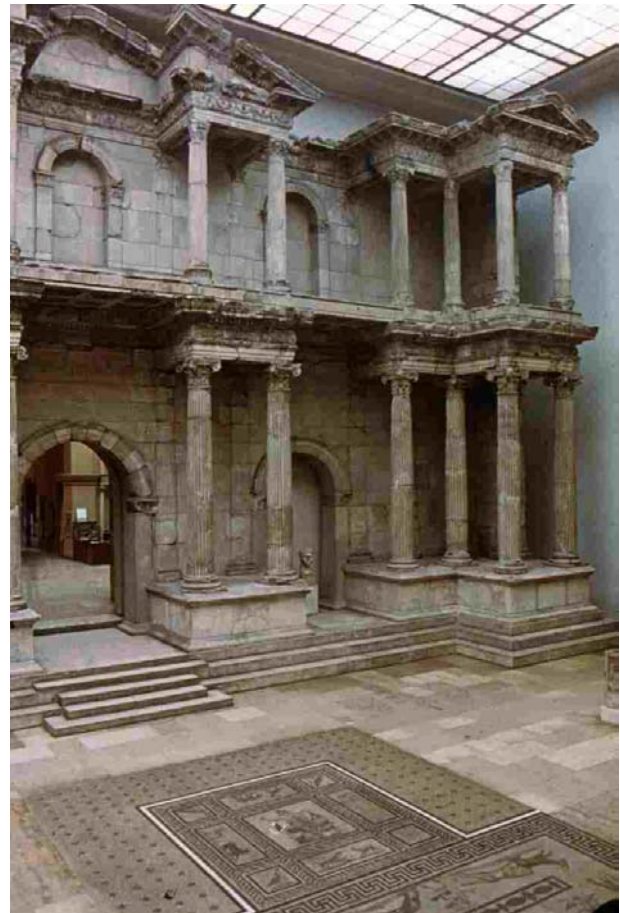


Abbildung 251: Markttor von Milet im Pergamonmuseum (oben) und Bohrkern seiner Säulen im Kellerarchiv der Antikensammlung

Probenmaterial zur Verfügung. Zunächst wurde nur Material einer hellweißen, mittel- bis grobkristallinen Variante analysiert (MilMaT1 und MilMaT2 von den Säulen N 33 und N 45). Da eine genauere Inspektion im Rahmen vorbereitender Arbeiten für eine Restaurierung des gesamten Markttors durch die Arbeitsgruppe Siegesmund/Rüdrich⁶⁹ einen weiteren feinkörnigen Marmortyp ermittelte, wurde im September 2003 unter Mithilfe von Martin Maischberger

⁶⁸ ZO bedeutet Zuordnung zu Lagerstätten.

⁶⁹ S. <http://wwwuser.gwdg.de/~tweiss/geomasek/markttor.htm>

(ARGE-Pfanner) gezielt zusätzliches Probenmaterial entnommen. Hiervon konnten allerdings nur noch Dünnschliffe (MilMa43, 59, 61) angefertigt werden.

Der petrographische, geochemische und isotope geochemische Befund der grobkörnigeren Variante deckt sich vollständig mit Probenmaterial der Brüche von Herakleia und unterscheidet sich eindeutig von allen anderen untersuchten Lagerstätten. Wie schon im Kapitel 6.4.4 über die Marmore am Bafa-See beschrieben und auch in der Bildtafel (Abbildung 252 unten) ersichtlich, ist die Bandbreite petrographischer Merkmale der Herakleia-Marmore allerdings beträchtlich.

So galt es die Frage zu beantworten, ob die feinkörnigeren und im Makrogefüge differenzierteren Marmore den Herakleia-Brüchen zugeordnet werden können, oder einem anderen Bruchgebiet entstammen, insbesondere den milesischen Brüchen am Südost-Ufer des Bafa-Sees (s. Karte Abbildung 144, vgl. auch Tabelle 32 auf S. 212). Zugleich erfolgt hier exemplarisch eine ausführlichere Beschreibung petrographischer Einzelmerkmale, die sich insbesondere beim Fehlen sonstiger Meßmethoden bei der Klärung von Zuordnungsfragen häufig als hilfreich erwiesen.

Die mittel- bis grobkörnige Herakleia-Variante

In Tabelle 31 sind einige Kennwerte der grobkörnigeren Herakleia-Marmore vom Markttor und aus den Steinbrüchen angeführt. Am frischen Bruchstück ist diese qualitativste Variante reiner Calcitmarmore von hellweißer Farbe mit ins Gräuliche spielenden wolkigen Tönen (je nach Lichtverhältnissen N 8,5-9 der Munsell-Farbskala). Die einzelnen Körner treten deutlich zu Tage, mit glänzenden Spaltflächen und teilweise erkennbarer Zwillingslamellierung, ohne jedoch Ablösungsspuren zu zeigen. Anders verhält es sich bei Probenmaterial aus den Steinbrüchen, dessen Oberfläche längere Zeit dem Verwitterungsangriff ausgesetzt war, und an dem die geringere Kornverzahnung ein Herauslösen aus dem Kornverband begünstigt. Unter dem Mikroskop zeigen diese Marmore in der Regel ein homogenes polygonales Korngefüge mit nur geringen Korngrößenunterschieden

(kleinere Körner treten untergeordnet auf), geraden bis buchtigen Korngrenzen und im Vergleich zu anderen Marmoren nur geringen Anzeichen postmetamorpher Stresses wie gebogenen Zwillingslamellen oder optischer Zweiachsigkeit. In der Probe **MilMaT1** (Abbildung 252) waren nur ein Quarzkorn und zwei kleine Hellglimmer zu finden, jedoch recht viele opake Körnchen (wahrscheinlich Pyrit), die wesentlich zu dem leichten Grauton beitragen dürften. In der Probe **MilMaT1-2** befinden sich lediglich 2 Quarzkörner, aber auch weniger opake Mineralien, ebenso in **MilMaT2**.

Das hohe Y/Ho-Verhältnis wie auch die geringen Spurenelementgehalte insgesamt sind ein weiterer Hinweis darauf, dass in den Sedimentationsraum der sehr reinen marinen Kalke, aus denen die grobkörnigere Variante gebildet wurde, nur ein geringer Eintrag von kontinentalen Detritus erfolgte (vgl. BAU *et al.* 1996; CRAMER 1998, S. 160).

Die Probe **Milma 59** (Abbildung 252) unterscheidet sich im Handstück nicht von den 3 vorigen Proben, zeigt im Dünnschliff jedoch etwas kleinere Korndurchmesser. Das vorwiegend gleichkörnige Gefüge, die geraden Korngrenzen, geringe Deformationserscheinungen sowie der niedrige Anteil an akzessorischen Mineralien (2 Quarzkörner 0,04 – 0,12 mm, 3 Hellglimmer 0,1–0,26 mm, 1 opakes Korn mit hexagonalem Anschnitt 0,03 mm) lässt sie zweifelsfrei der grobkörnigeren Marmorvariante von Herakleia zuordnen, wobei der kleinere Korndurchmesser schon den Übergang zur feinkörnigeren Gruppe andeutet.

Die feinkörnigere Markttor-Marmorvariante

Die feinkörnigeren Marmore zeigen eine gräuliche Färbung (N7-N8) und treten mit und ohne kleinräumige Bänderung auf.

Die Probe **MilMa43** (Abbildung 252) besteht aus einem fein-mittelkörnigen weißen Marmor, der im Handstück eine kaum sichtbare gräuliche Bänderung aufweist, die im gesägten Block deutlicher zu Tage tritt. Im Dünnschliff zeigt sich ein Gefüge mit MGS um 2 mm, das von subparallelen Lagen feinerer Körner durchzogen wird. Die größeren Körner wirken weißer und besitzen eine deutlich höhere Lichtdurchlässigkeit als die gräulicheren, feinkörnigen Lagen. Die Korngrößenverteilung innerhalb der beiden

Probe	MGS (mm)	AGS (mm)	ΣSEE (ppm)	ΣSEE/Y	Y/Ho	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Mg Gew%	Sr (ppm)	Fe/Sr	δ ¹⁸ O	δ ¹³ C
Milet Markttor m-körnig	2-3.4	0.7-1.3	0.1 0.4	0.2 0.8	140	13 37	3.5 5.1	0.10 0.11	67-87	0.19 0.55	-3.7/ -3.47	1.46/1.78
Herakleia m-körnig	2-4	0.8-1	0.1-0.57	0.07-1.1	125-153	9-53	2.5-10	0.7-0.3	47-120	0.05-0.8	-1.8/ 3.9	1.12/2.41

Tabelle 31: Streubereiche einiger Kennwerte der mittel-grobkörnigeren Variante der Herakleia-Marmore (MGS, AGS: Maximaler und mittlerer Korndurchmesser, ΣSEE: Summe der Selten Erdelemente)

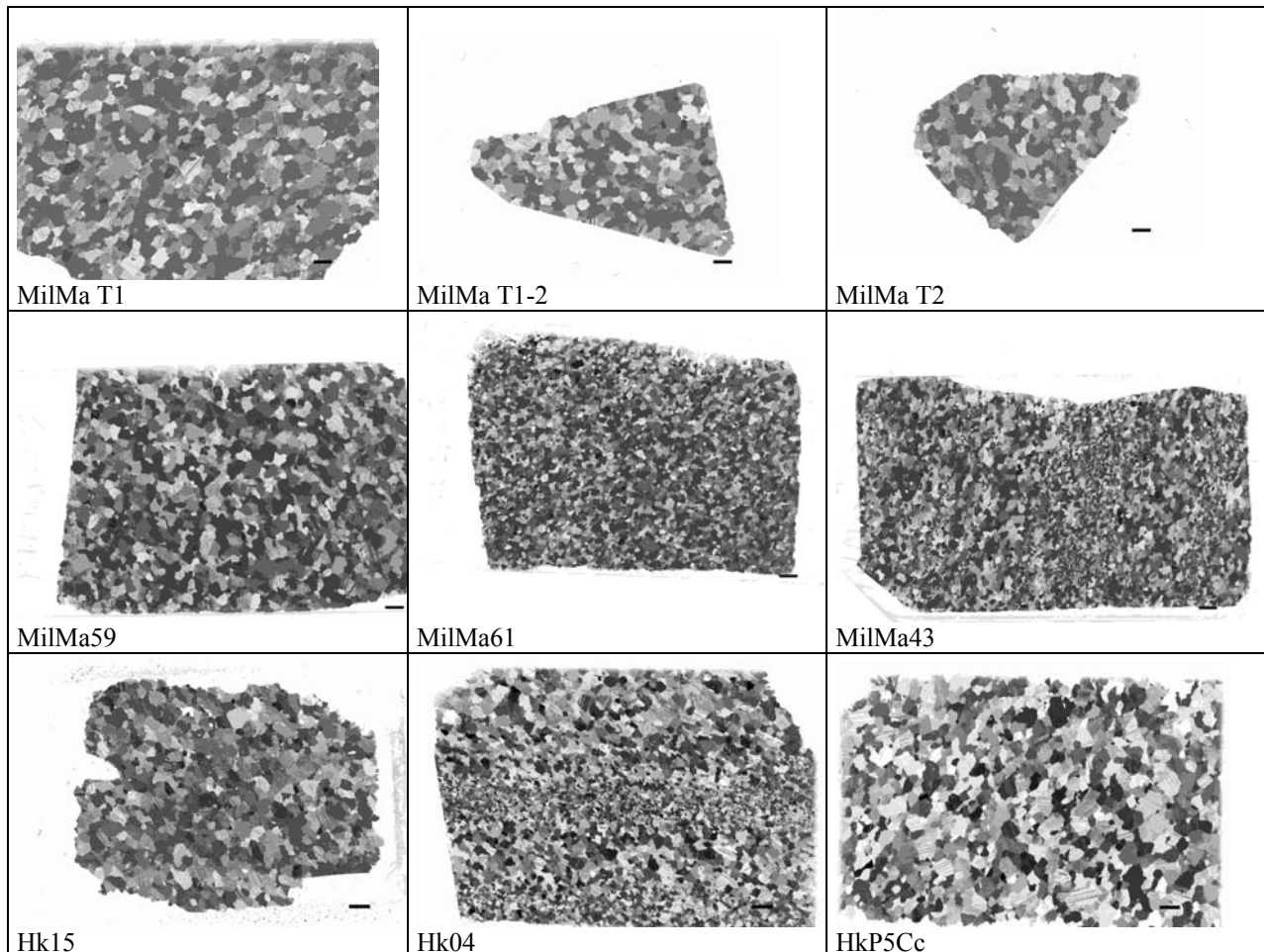


Abbildung 252: Bildtafel mit Dünnschliffen von Marmoren des Markttores von Milet und den Herakleiaabbrüchen N+, Maßstabsbalken 2 mm

Bereiche ist jeweils recht homogen, mit geraden bis buchtigen Korngrenzen und häufigen Zwillingslamellen, die allerdings meist nur einscharig und nicht gebogen sind. Ebenso deutet das Fehlen undulierender Auslöschung auf – wenn überhaupt – lediglich geringen postmetamorphen Stress. Glimmer oder detritischer Quarz wurden nicht gefunden; lediglich im Bereich kleinerer Körner befindet sich ein 0,3 mm längliches Quarzkorn mit einer angedeuteten idiomorphen Kante, das sekundär entstanden ist. Teilweise durchtrennen die kleineren Körner die größeren Calcitkristalle. Beide Befunde deuten darauf hin, dass die feinkörnigen Lagen nicht nur primäre relikti-

sche Sedimente repräsentieren, sondern auch sekundär im Marmor gebildet wurden. Im gesamten Schliff kommen gleichmäßig verteilt ca. 20 opake Mineralkörner bis 0,05 mm Durchmesser vor.

Die Probe **MilMa61** ist noch feinkörniger, allerdings im Handstückbereich ohne erkennbare Bänderung. Als einzige Probe strömte sie schon beim Anschlagen einen intensiven Geruch nach H₂S aus. Unter dem Mikroskop zeigt sie die größten Abweichungen vom Idealtyp der Herakleia-Marmore: neben der Feinkörnigkeit ist das Gefüge durch deutliche Anzeichen postmetamorphen Stresses gekennzeichnet: eine annähernd bimodale Korngrößenverteilung mit einem höheren Anteil noch kleinerer Körner, gezahnte Korngrenzen,

deformierte Zwillingslamellen und teilweise undulierende Auslöschung.

Jedoch fanden sich nur 2 Quarz- und Glimmerkristalle, und sehr wenig opake Minerale. Trotz des Geruches sind mikroskopisch kleine Einschlüsse wesentlich undeutlicher als in

Probe MilMa43 erkennbar. Möglicherweise wird die einheitliche Grautönung nicht so sehr durch mineralische und Fluideinschlüsse als vielmehr durch die ausgeprägten intra- und intergranularen Deformationserscheinungen, besonders die unregelmäßigen Korngrenzen, hervorgerufen.

Milet-Tor: Eine oder mehrere Marmorquellen?

Die grobkörnigere Variante der untersuchten Marmore ist eindeutig den Herakleia-Brüchen zuzuordnen. Zwar kommen gelegentlich auch bei den Marmoren von Milet-Ost und besonders Milet-West grobkörnigere Varianten vor, ihre maximalen Korndurchmesser überschreiten aber kaum 2,2 mm, während bei den Herakleia-Marmoren bis 4 mm gemessen wurden. Bei den feinkörnigeren Marmoren aus den drei Bruchgebieten zeigen sich größere Überschneidungen, so dass eine Herkunft der feinkörnigeren Varianten der Marmore des Milet-Markttors vom südlichen Bruchgebiet grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden kann. Jedoch zeigen sich die gleichen Merkmale auch bei den Herakleia-Marmoren, wo es stark gebänderte Varianten gibt, von denen die dunkleren beim Anschlagen auch einen deutlich wahrnehmbaren Geruch nach H₂S ausströmen. Statt anzunehmen, dass für einen Teil des Markttors die Herakleia-Marmore und für einen anderen die schlechteren Qualitäten aus den kleineren und schwerer erreichbaren Brüchen am Südufer des Bafa-Sees herangezogen wurden, erscheint es sinnvoller, für das Markttor von Milet als einem großen Bauprojekt insgesamt die Verwendung von Marmoren aus ein und der selben Lagerstätte – nämlich Herakleia – zu postulieren. Angesichts ihrer großen Abbaukapazität wie auch der politischen Stabilität in der Römerzeit dürfte das Problem einer Marmorverknappung der Herakleia-Brüche nicht bestanden haben.

Inwieweit die unterschiedlichen Qualitäten unter bearbeitungstechnischen, baustatischen und ästhetischen Gesichtspunkten an bestimmten Teilen des Markttors eingesetzt wurden, lässt sich wohl erst bei einer Sanierung und insbesondere Reinigung der teilweise stark verschmutzten Oberflächen abschließend beurteilen. Es bleibt zu hoffen, dass die Untersuchung dieser spannenden Frage zeitgleich mit der Reinigung angegangen wird, da die Erfahrung am Pergamonaltar zeigt, dass infolge erneuter Schmutzanlagerung das Zeitfenster für solche Beobachtungen nur relativ kurz geöffnet bleibt.

Die Untersuchung des Markttors von Milet unterstreicht aber auch die schon beim Pergamonaltar festgestellte Notwendigkeit, bei Provenienzbestimmungen an größeren Ensembles sich nicht auf einige wenige Proben zu verlassen und – wo immer möglich – sich mit anderen Projektbeteiligten auszutauschen. Hätten wir zufälligerweise nur Probenmaterial der feinkörnigeren Marmorvariante zur Verfügung gehabt, wäre eine Zuordnung zu Herakleia nicht mit dieser Bestimmtheit erfolgt.

Deshalb kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass einige der von uns und anderen Arbeitsgruppen den südlichen oder anderen Brüchen zugeordneten Marmorartefakte doch den bedeutend größeren Herakleia-Brüchen entstammen. Bei hinreichendem Probenmaterial und unter Einbeziehung aller makroskopischen Merkmale ist die Herkunftsfrage aber in der Regel lösbar.

7.3.2 Mi1) Delphinion-Altar: ionisches Kyma, Deckplattenecke, Voluten (ZO MyLS28)

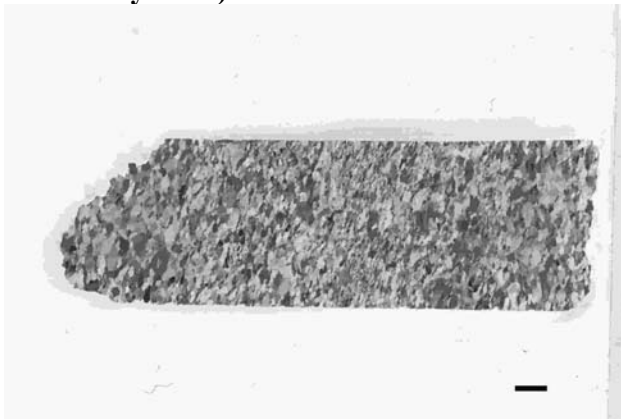


Abbildung 253: Delphinion Kyma, paralleler und senkrechter Schnitt, N+, Maßstabsbalken 2 mm

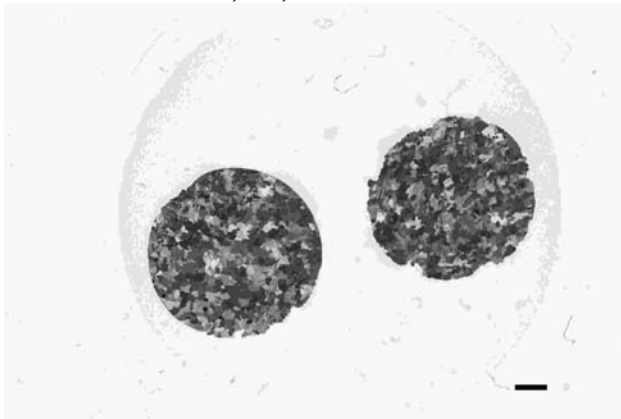


Abbildung 254: Delphinion Platte, N+, Maßstab 2mm

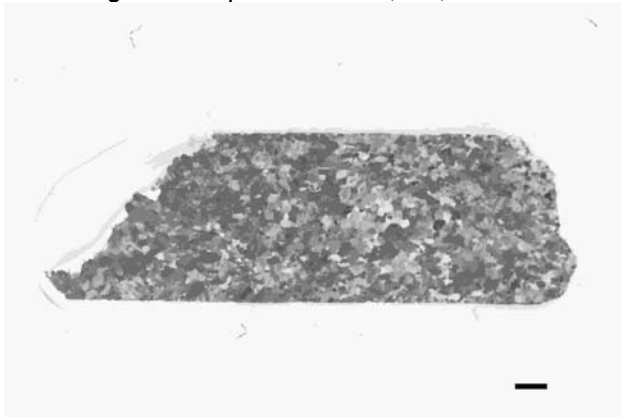


Abbildung 255: Delphinion Volute, N+, Maßstabsbalken 2 mm

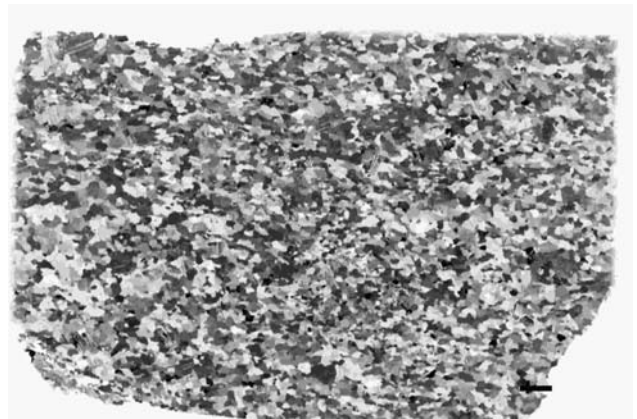


Abbildung 256: Dünnschliff eines Marmorvorkommens bei Myus (MyLS28), N+, Maßstabsbalken 2 mm



Abbildung 257: DS einer Probe von Priene (Pri4), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Zunächst galt es beim Delphinion von Milet zu klären, ob Kyma, Platten und Voluten aus dem gleichen Marmor hergestellt wurden. Schon der Vergleich der drei Dünnschliffaufnahmen (Abbildung 253, Abbildung 254 und Abbildung 255) legt dies nahe. In der Literatur findet sich lediglich ein zutreffender Hinweis für die ionische Kyma, die „aus weißem, horizontal geschichtetem Marmor“ (KOENIGS 1980) bestehe und als spätarchaisch (KAWERAU & REHM 1914), teils auch als frühklassisch (nach 478, KOENIGS 1980, S.75) datiert wird. Neben dieser „Schichtung“, die eher auf Korneinregelung und -längung als auf eine Nachzeichnung der Sedimentation zurückgeht, ist die Feinkörnigkeit der Marmore charakteristisch, bei einer starken petrographischen Ähnlichkeit mit Proben aus Marmorvorkommen bei Myus und Priene (Abbildung 256 und Abbildung 257).

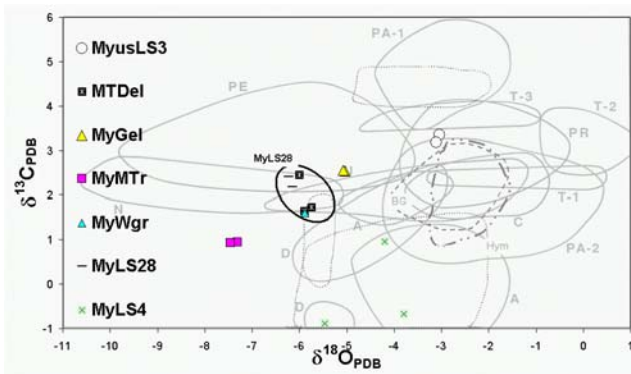


Abbildung 258: Isotopie von Wagenrennenfries, Mantelträger, Gelagertem aus Myus, Delphinion aus Milet und Geländeprobe bei Myus (MyLS28 und andere)

Die Isotopie der Delphinion-Marmore überlappt mit den Feldern von Penteli und Naxos, liegt jedoch auch im Bereich der Lagerstätte MyLS28 von Myus; ein Wert ist mit dem des Wagenrennenfrieses von Myus fast identisch (Abbildung 258).

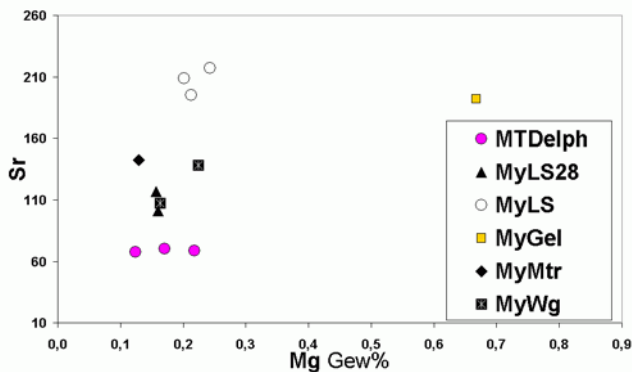


Abbildung 259: Mg/Sr von Marmoren aus Milet und Myus

Bei fast gleichen Sr-Gehalten der Delphinion-Proben ergibt sich ebenfalls ein vertretbarer Abstand zu denen von MyLS28 und dem Wagenrennenfries MyWg. Allen gemeinsam ist ein sehr niedriger Mg-Gehalt (Abbildung 259).

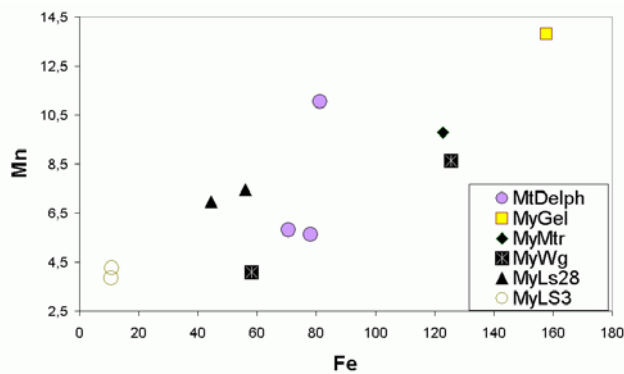


Abbildung 260: Fe/Mn von Marmoren aus Myus und Milet

Die niedrigen Fe- und Mn-Werte der Proben passen gleichfalls gut zusammen, wobei ein leicht erhöhtes Wertepaar des Wagenrennenfrieses dicht an dem des Mantelträgermarmors liegt (Abbildung 260).

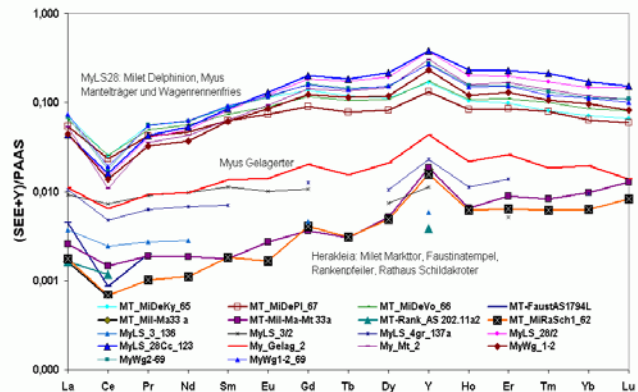


Abbildung 261: SEE-Verteilungsmuster mit deutlichen Unterschieden: Delphinion von Milet, Mantelträger und Wagenrennenfries aus Myus stimmen gut mit der Lagerstätte MyLS28 überein; die niedrigeren Werte der antiken Objekte von Milet mit Herakleia.

Trotz gewisser Schwankungen korrespondieren die SEE-Verteilungsmuster (Abbildung 261) der Delphinionproben bei insgesamt hohen Absolutgehalten sowohl untereinander wie auch mit Proben vom Wagenrennenfries, Mantelträger und dem Steinbruch MyLS28 bei Myus.

Es sei hier schon auf zwei Punkte hingewiesen: zum einen findet die Abweichung der Isotopie des Mantelträgers abgeschwächt auch in den anderen geochemischen Werten ihren Ausdruck. Später wird gezeigt, dass seine Marmormerkmale tatsächlich besser mit denen des archaischen Kouros von Didyma (Kapitel 7.5.3) übereinstimmen.

Zweitens unterscheiden sich die in den Abbildungen erkennbaren Daten des Gelagerten aus Myus (MyGel) deutlich von denen aller anderen Proben. Die niedrigen SEE-Werte und das zwei anderen bei Myus entnommenen Geländeprobe (MyLS3 und 4) ähnelnde SEE-Verteilungsmuster findet keine Entsprechung in den sonstigen Merkmalen, die eher auf eine pentelische Quelle hinweisen.

Ohne dies im Detail auszuführen, fällt die Isotopie des Delphinions auch mit Werten von Proben zusammen, die in den antiken Prienebrüchen entnommen wurden (Abbildung 174 in Kapitel 6.4.7) und deren petrographische Ähnlichkeit (Pri4) in den obigen Dünnschliffaufnahmen (Abbildung 253 - Abbildung 257) er-

kennbar ist. Auch bei den SEE besteht, abgesehen von einem höheren La-Gehalt, eine ähnliche Übereinstimmung wie bei Sr und Mn. Jedoch sind die Fe- und Mg- (Dolomit)-Anteile höher. Zudem fehlt der Probe Pri4 (Abbildung 257) eine erkennbare Kornlängung, sie ist gleich- und auch feinkörniger, und das Korngefüge wirkt etwas aufgelockerter und insgesamt gräulicher. Da diese Probe ansonsten eher eine Ausnahme unter dem Priene-Probenmaterial bildet, kann Priene zwar nicht ausgeschlossen werden, aber die Lagerstätte bei Myus wird favorisiert. Angesichts des beachtlichen Abbauvolumens der Priene-Brüche sollte diesem Hinweis einer möglichen frühen Beziehung zwischen Priene und Milet jedoch weiter nachgegangen werden. Zusammenfassend kann die gemeinsame Herkunft aller drei Teile des Delphinions aus einer gemeinsamen Lagerstätte als gesichert angesehen werden. Wahrscheinlichste Herkunftsquelle sind Marmorausbisse zwischen Myus und dem NW-Ufer des Bafa-See.

7.3.3 Mi2) Rankenfeiler vom Nymphäum (ZO Herakleia)

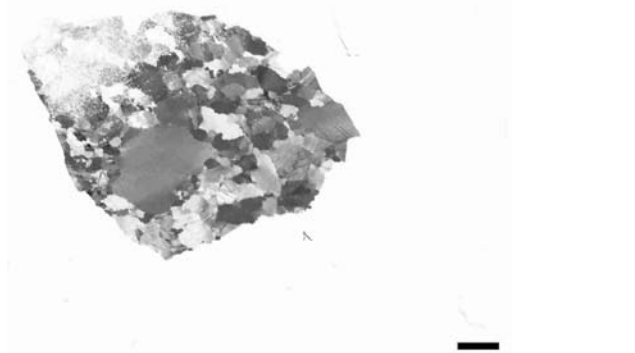


Abbildung 262: DS-Aufnahme des Rankenfeilers vom Nymphäum in Milet mit großem Calcitkristall, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Zu dem um 80 u.Z. datierten Nymphäum findet sich folgender früher Hinweis: „Während die genannten Pfeilerschäfte aus dem gewöhnlichen weißen Marmor wie die sonstigen Bauglieder bestehen, sind die wenigen erhaltenen Fragmente der unkannelierten Säulenschäfte aus einem fleischfarbenen, rötlich-gelb geaderten oder geflammten Brecciamarmor hergestellt...“ (HÜLSEN 1919). Der Rankenfeiler selbst besteht aus einem weißem Marmor mit einigen großen Calcitkristallen in einer ansonsten eher mittelkörnigen Matrix (Abbildung 262). Die Abwesenheit von Dolomit (XRD=0, Mg 0,03

Gew%), sehr niedrige Spurenelementgehalte (Fe 18, Mn 2,5, Sr 63 ppm), das SEE-Verteilungsmuster, die Isotopie sowie die trotz des heterogenen Gefüges auf einen höheren Metamorphosegrad hinweisenden Korngrößen bis 4 mm lassen eine auch durch die Diskriminanzanalyse gestützte Herkunft aus den Herakleia-Brüchen als wahrscheinlich erscheinen, die in der Römerzeit in Abbau gestanden haben, wie aus ihrer Erwähnung im Preisedikt des Diokletian hervorgeht.

7.3.4 Mi3) Rathaus (Schildakroter) (ZO MTW-Hk)

Der weiße Marmor des Schildakroters am Rathaus von Milet nimmt mit seinem mittelkörnigem Gefüge (MGS 2,8-2,4; AGS um 1 mm) eine Mittelstellung zwischen den Brüchen von Milet West und Herakleia ein. Jedoch zeigen die vorhandenen Schriffe der Milet-West-Brüche mit vergleichbaren Korngrößen meist ein heterogeneres Gefüge, das sich auch in niedrigeren AGS ausdrückt und wohl Folge davon sein dürfte, dass sich nicht hinreichend hohe Metamorphosegrade über einen längeren Zeitraum zur Homogenisierung der Korngrößenverteilung einstellten.

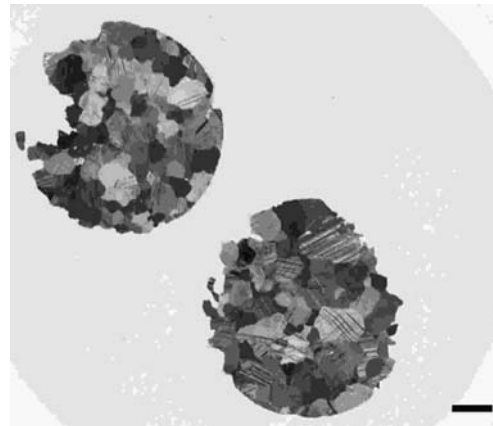


Abbildung 263: Dünnschliffaufnahme des Schildakroters am Rathaus von Milet, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Andererseits sind die Dünnschliffproben zu klein (Abbildung 263), um ein repräsentatives Bild zu ergeben, und bei entsprechend kleinen Ausschnitten finden sich auch in den Milet-West-Dünnschliffen identische Gefüge. Ansonsten treten gegenüber Herakleia etwas erhöhte Spurenelementgehalte (Sr 111, Fe 85, Mn 14 ppm) bei im Vergleich zu Milet-Ost niedrigem Mg (0,19 Gew%) auf. Das SEE-Verteilungsmuster passt sowohl zu Milet-West als auch Herakleia, ebenso die Isotopie. Insbe-

sondere wegen des Chemismus wird in der Gesamtwertung eine Zuordnung zu Milet-West vorgenommen, ohne aber Herakleia mit Sicherheit auszuschließen. Auch die Diskriminanzanalyse bekräftigt eine Herkunft von den Milet-West-Brüchen.

7.3.5 Mi5) Faustinathermen, Dionysos und Satyr (ZO MTW oder Herakleia)

Diese römische Badanlage wurde von Faustina, Gattin von Marcus Aurelius (161-180), gestiftet. Auffällig ist die Verwendung von Glimmerschieferblöcken für die Fundamente bis hinauf zu den marmornen Rundbögen, sowie von vermörtelten Gesteinsbrocken, bei denen es sich möglicherweise um rezykliertes Material handelt. Wie weit diese mit Marmorplatten verkleidet waren, entzieht sich meiner Kenntnis. Diese in der Marmorverwendung recht sparsame Gebrauchsarchitektur war hingegen reichlich mit Skulpturen ausgestattet.



Abbildung 264: Dünnschliff Dionysos und Satyr von Faustinathermen Milet, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Für die figürliche Darstellung des Dionysos und eines Satyrs wurde offensichtlich ein Marmor aus den östlichen Bruchgebieten des Bafa-Sees verwendet. Die maximalen Korngrößen bis 2,4 mm schließen auch Herakleia nicht aus, allerdings ist das erkennbare Gefüge (Abbildung 264) sehr inhomogen und von Spuren stärkerer Dynamometamorphose gekennzeichnet, wie es bei den Milet-West-Brüchen häufiger beobachtet werden kann. Die Spurenelementgehalte sind sehr niedrig und konnten bei den SEE nur unvollständig erfasst werden, das La/Ce Muster liegt näher bei dem der Proben aus den Milet-West-Brüchen als von Herakleia. Isotopie und Chemismus zeigen die beste Übereinstimmung sowohl mit Herakleia als auch den grobkörnigeren Varianten der Milet-West-Brüche, ohne dass zwischen diesen eine sichere Abgrenzung vor-

genommen werden kann. Die Diskriminanzanalyse verweist auf eine Herkunft aus den Milet-West-Brüchen. Näheren Aufschluss könnte angesichts der schon recht langwährenden römischen Herrschaft eine präzisere Kenntnis über das genaue Ende der Produktion in beiden Bruchgebieten liefern.

7.4 Myus



Abbildung 265: Das antike Myus während der Ausgrabungen. Im Hintergrund der Mäander

Das antike Myus (Karte Abbildung 144, GPS N 37°35'56,9'', E27°25'45'') ist die älteste in dieser Arbeit untersuchte archaische Siedlung. Heute läßt sich von den in Abbildung 265 gut sichtbaren antiken Überresten kaum noch etwas erkennen. Ein Teil seiner Marmore wurde möglicherweise bei der Aufgabe der Siedlung nach Milet und Didyma mitgenommen, ein Teil in einer byzantinischen Anlage wiederverwendet und ein Teil dürfte wieder verschüttet sein. Wichtige Fundstücke konnten geborgen und in der Berliner Antikensammlung aufbewahrt werden. Die Abbildung 265 verdeutlicht auch, wie sehr sich das Landschaftsbild und der Flußlauf des Mäanders in den letzten 150 Jahren nicht zuletzt durch intensive landwirtschaftliche Nutzung verändert haben. Der glatte bearbeitete dunkle Untergrund der wenigen freien Flächen wird von Quarzlinsen und -bändern durchzogen; daneben finden sich auf engstem Raum schlecht ausgebildete Marmore, Glimmerschiefer und Gneise als Ausläufer des Menderes-Gneiskernes. Zwei Gneissteinbrüche bei Myus wurden als Bezugsquelle für die Errichtung der 8 km langen Stadtmauer von Milet ermittelt (SCHRÖDER & YALÇIN 1991). Beide Autoren erwähnen auch antike Marmorsteinbrüche bei Myus am NW-Ufer des Bafa-Sees, ohne dass

allerdings Messwerte zur Verfügung stehen. Zwar dürfte unser zwischen Myus und dem NW-Ufer des Bafa-Sees nicht systematisch gesammeltes Probenmaterial mit diesen kaum identisch sein, gehört aber sicherlich zur gleichen geologischen Einheit in engerer Nähe zum Menderes-Gneiskern (s. Diskussion der Kornlänge im Zusammenhang mit Priene im Kapitel 6.4.7).

7.4.1 My1) Mantelträger (ZO Milet West?)



Abbildung 266: Seiten- und Vorderansicht des Mantelträgers von Myus im Pergamonmuseum

Schon im Museum ist am Mantelträger von Myus (Abbildung 266) die Verwendung eines feinkörnigen Marmors mit etwas grobkörnigeren Partien erkennbar, die dem äußeren Anschein nach gut mit den Marmoren von Milet West übereinstimmen. Leider war die Probenmenge für die Anfertigung eines Dünnschliffes nicht ausreichend. Seine geochemischen und isotopischen Werte decken sich mit denen der Brüche von Milet-West im Allgemeinen und des archaischen Kouros von Didyma im Besonderen (Kapitel 7.5.3). Der Mantelträger wird um 530 bzw. das 2. Viertel des 6. Jh. v.u.Z. datiert (BLÜMEL 1963; TUCHELT 1970) und wäre damit einer der frühesten Belege für die Ausbeutung der Milet-West-Brüche. Umso dringender sind deshalb zum einen weitere Beprobungen des Mantelträgers als auch eine systematische Untersuchung weiterer potentieller Marmorquellen bei Myus geboten.

7.4.2 My2) Gelagerter (Hermonax) (ZO Penteli?)

Von diesem archaischem Fundstück (Abbildung 267) konnte lediglich Probenmaterial für geochemische Analysen entnommen werden, nicht jedoch für Dünnschliffe. Im Museum zeigt der Gelagerter charakteristische äußere Merkmale pentelischer Marmore: ein sehr feinkörniges Gefüge in einem ansonsten homogenem Marmor, der von einer gelblichen Patina belegt ist. Der sie verursachende relativ hohe Fe-Gehalt (Abbildung 269) sowie die Sr- und Mg-Werte (Abbildung 268) decken sich mit den – allerdings nur sehr wenigen – Messwerten pentelischer Marmore. Lediglich der Mn-Gehalt ist niedriger als bei unseren pentelischen Proben, liegt aber doch im unteren Bereich von Literaturangaben zu pentelischen Marmoren. Das SEE-Verteilungsmuster (Abbildung 270) und insbesondere der im Verhältnis zu La höhere Cer-Wert decken sich gleichfalls mit den pentelischen Proben, ebenso der übereinstimmende Kurvenzug im $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ -Verhältnisdiagramm (Abbildung 271).

Eine pentelische Probe verhält sich in den meisten hier verwendeten Diagrammen als Ausreisser. Damit soll auf das Problem hingewiesen werden, dass für eine sichere Zuordnung alleine anhand dieser Merkmale unsere Datenbasis bei weitem nicht ausreichend ist, sondern lediglich als Indiz dienen kann. Die Diskriminanzanalyse gibt basierend auf den geochemischen Daten ohne Einbeziehung der MGS als wahrscheinlichste Herkunft Marmara an (was jedoch schon wegen der erkennbaren äußeren Merkmale ausgeschlossen ist), als zweitbestes Ergebnis ebenfalls Penteli.



Abbildung 267: Gelagerter von Myus im Pergamonmuseum

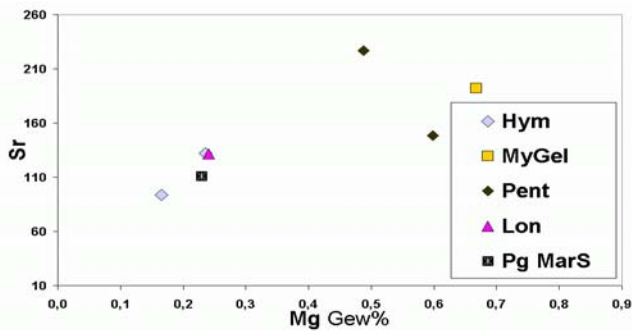


Abbildung 268: Mg-Sr-Korrelationen pentelischer Marmorproben und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon

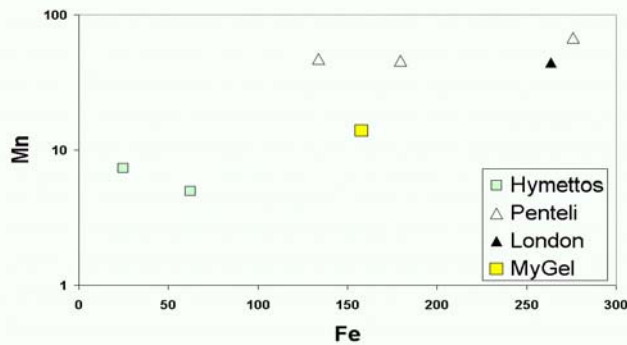


Abbildung 269: Mn-Fe-Korrelationen pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon

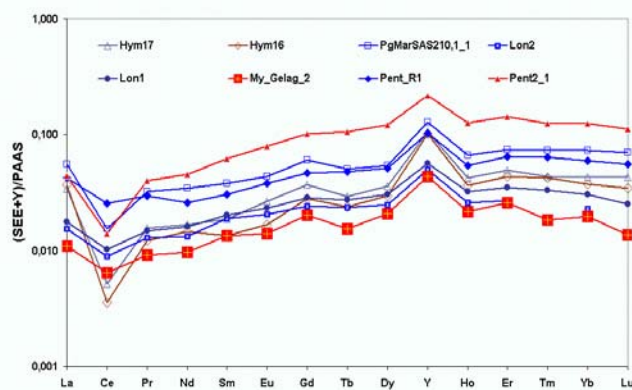


Abbildung 270: SEE-Verteilungsmuster pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus mit schwächer ausgeprägtem Ce_{neg} sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon

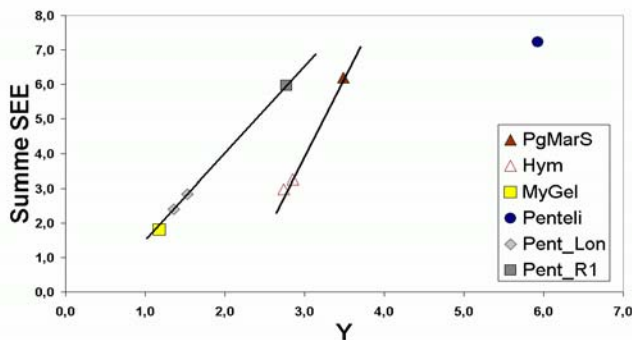


Abbildung 271: $\Sigma SEE/Y$ -Korrelationen pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore

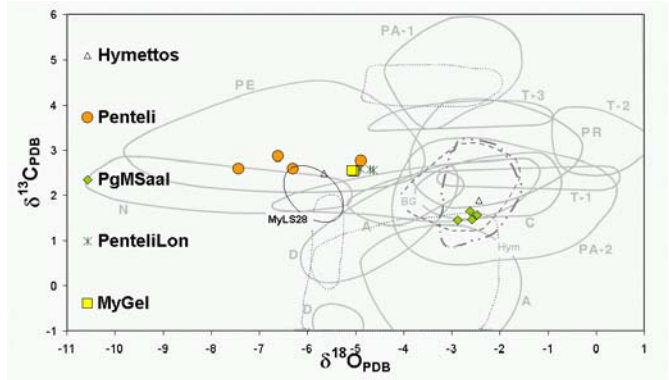


Abbildung 272: Isotopendiagramm pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon

Eindeutiger fällt hingegen die Isotopie aus (Abbildung 272). Genauso wie sie bei den Marmoren des Waffenreliefs von Pergamon im hymettischen Isotopenfeld liegt, befindet sich die des Gelagerten zusammen mit den anderen pentelischen Proben unzweideutig im Bereich pentelischer Marmore. Wie im nächsten Kapitel (7.4.3) gezeigt, liegt sie allerdings auch nahe bei der lokaler Marmorquellen wie MyLS28.

Es gibt zahlreiche Beispiele dafür, dass schon anhand wesentlich weniger Merkmale eindeutige archäometrische Lagerstättenzuordnungen getroffen wurden. Jedoch wird von archäologischer Seite her eine pentelische Herkunft des Gelagerten-Marmors stark angezweifelt, da die Brüche am Pentelikon erst nach der Fertigung dieses archaischen Meisterwerks Mitte des 6. Jh. v.u.Z. (BLÜMEL 1963; TUCHELT 1970) in Betrieb gegangen seien und ein solch früher Transport über eine so weite Strecke unwahrscheinlich ist. Für den Abbaubeginn pentelischer Marmore wird unterdessen allerdings ebenfalls das 6. Jh. v.u.Z. angegeben (ATTANASIO 2003). All dies macht die große Bedeutung einer präzisen Datierung nicht nur der antiken Artefakte sondern auch des Abbaueiterraums von antiken Marmorbrüchen überdeutlich.

So bleibt die genaue Herkunftsbestimmung eines der frühesten Marmorartefakte offen, und weitere Beprobungen, Messungen, die Erweiterung unserer Datenbasis pentelischer Marmore sowie die eventuelle Entdeckung antiker Marmorbrüche mit den beschriebenen pentelischen Merkmalen in der Umgebung von Myus müssen abgewartet werden.

7.4.3 My3) Wagenrennen-Fries (ZO: MyLS28 = Lagerstätte bei Myus)



Abbildung 273: Wagenrennenfries aus Myus. In der Mitte Ergänzung.

Der Wagenrennen-Fries aus Myus (Abbildung 273) wird um die Mitte des 6. Jh. v. u.Z. datiert, sein Material als „weißer und grauweißer Marmor“ beschrieben (BLÜMEL 1963).

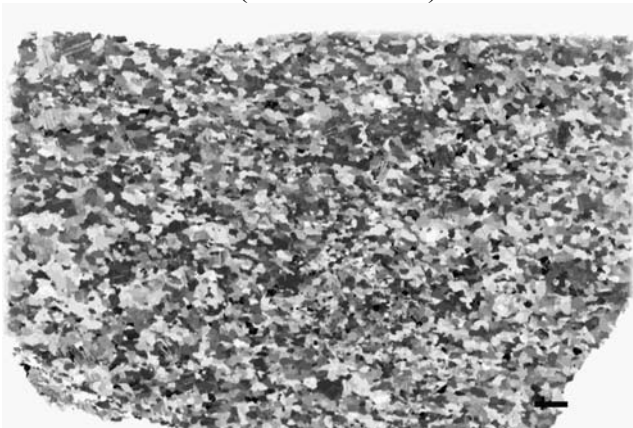


Abbildung 274: Dünnschliff eines Marmorvorkommens bei Myus (MyLS28), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Wenn auch nicht in der gleichen Eindringlichkeit wie auf den Photographien ist in den digitalisierten Dünnschliffaufnahmen die petrographische Übereinstimmung zwischen den Marmoren des Vorkommens bei Myus (MyLS28, Abbildung 274) und denen des Wagenrennenfrieses (Abbildung 275) unverkennbar.

Die Isotopie des Wagenrennenfrieses ($\delta O -5,89$ / $\delta C 1,61$) ist mit der der Platte des Delphinions von Milet ($-5,90$ / $1,65$) fast identisch, dessen Merkmale untereinander und mit dem Marmorausbiss MyLS28 bei Myus übereinstimmen (s. Abbildung 258).

Die sonstigen Übereinstimmungen mit der Lagerstätte MyLS28 wurden bereits im Kapitel 7.3.2 anhand des Delphinion-Altars von Milet diskutiert.

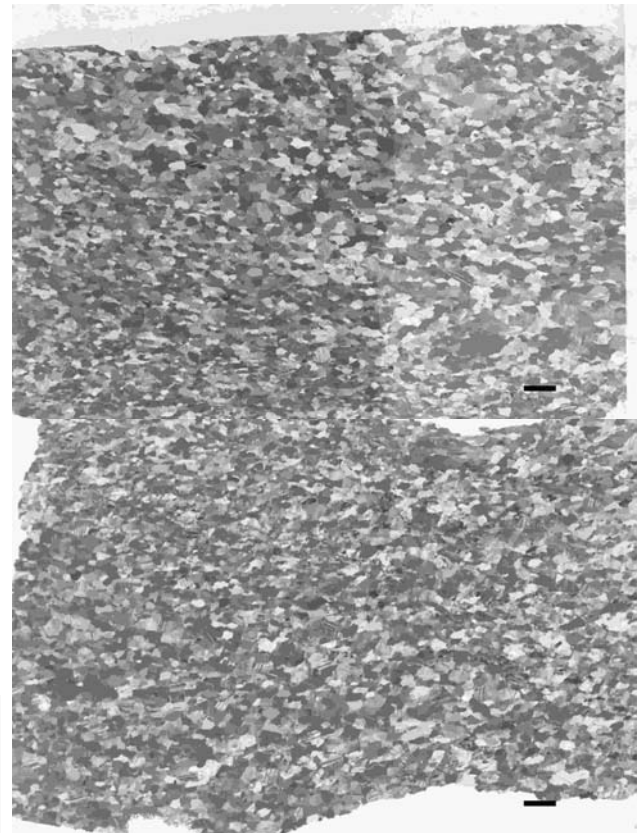


Abbildung 275: Dünnschliffaufnahmen des Wagenrennenfrieses (o.) und des Kapitells (u.), N+, Maßstabsbalken 2 mm

7.4.4 Archaische Säulenfragmente, Kapitell (ZO MyLS28 = Lagerstätte bei Myus)

Das untersuchte archaische Fragment⁷⁰ aus Myus ist Teil eines in die Mitte des 6. Jhs. oder früher datierten Säulenfragments (KOENIGS 1980). Sämtliche Merkmale sind mit denen des Wagenrennen-Frieses identisch und sprechen für die Herkunft von der als MyLS28 bezeichneten lokalen Marmorquelle.

⁷⁰ Unglücklicherweise sind die Beschriftungen der archaischen Säulenfragmente aus Myus und des Wagenrennenfrieses aus Myus bei der Probenaufbereitung verlorengegangen und wurden insgesamt als Wagenrennenfries bezeichnet. Aufgrund der Identität sämtlicher Merkmale beider Marmore war eine nachträgliche Trennung weder möglich noch unbedingt erforderlich.

7.5 Didyma



Abbildung 276: Säule an N-Seite des Didymaion mit deutlichen dolomitischen Relikten

Am Apollontempel von Didyma entzündete sich eine erste Diskussion über die Herkunft seiner Marmore (vgl. Kapitel 6.5.2), für die zunächst Phourni (KNACKFUSS 1941) als Lieferant galt, bis dann lokale Marmorquellen (u.a. der Mykale) in Erwägung gezogen wurden (GRUBEN 1963), was schließlich präzisiert (GERMANN 1981; PESCHLOW-BINDOKAT 1981) und durch diese Untersuchung weitgehend bestätigt werden konnte. Da das Didymaion auf neogenem Kalksteinuntergrund errichtet wurde, mußten ähnlich wie in Milet sämtliche Marmore aus Brüchen der näheren und fernerer Umgebung herangeholt werden. Hierfür bot der Hafen Panormos in der nördlich gelegenen Kovellabucht beste Voraussetzungen, wie auch dort liegende Werkstücke zeigen. Datiert wird der Baubeginn dieses Heiligtums von Milet um 550-525 v.u.Z. (OHNESORG 1993), setzte sich aber – ohne je fertiggestellt zu werden – in die römische Zeit fort und ist als großartiges erhaltenes Ensemble heute nicht nur eine küstennahe touristische Attraktion sondern auch Gegenstand fortlaufender archäologischer Forschungen. Zur Geologie, Archäologie und den verwendeten Werksteinen am Didymaion s. z.B. BORG & BORG (1998; 2002a; 2002b) und BORG *et al.* (2000).

7.5.1 Di1) Frauenkopf einer Columna Caelata vom archaischen Apollontempel) (ZO MyLS28 = Lagerstätte bei Myus)



Abbildung 277: Frauenkopf einer Columna Caelata im Berliner Museum



Abbildung 278: Columna Caelata mit stark gelängten Calcitkristallen, N+, Maßstabsbalken 2 mm

In das 3. Viertel des 6.Jh.v. u.Z. datiert (540-530 FLOREN 1987) stammt der Marmor der archaischen Columna Caelata schon äußerlich erkennbar keineswegs „von der Insel Korossai bei Ikaria“ (BLÜMEL 1963). Ihre Merkmale entsprechen aber auch nicht denen der Brüche am Ostufer des Bafasees, sondern weitgehend denen der an anderer Stelle diskutierten Lagerstätte MyLS28 bei Myus, in der auch Kornlängung auftritt.

7.5.2 Di2) Archaische Säulenfragmente (Apollontempel, Kapitellfragment) (ZO MTW)

Zwar liegen die erfassten Mg-Gehalte des archaischen Kapitellfragments unter 0,3 Gew% (XRD wurde nicht gemessen). Aber im oberen Dünnschliff in Abbildung 279 sind deutlich Lagen feinkörnigen Dolomits zu erkennen, ein

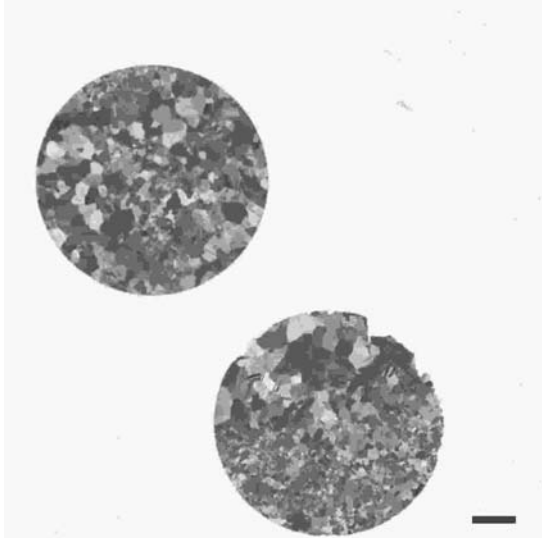


Abbildung 279: S&W-Aufnahme von Dünnschliff des archaischen Kapitells von Didyma mit Dolomitlegen in Marmor von Milet West, N+, Maßstabsbalken 2 mm

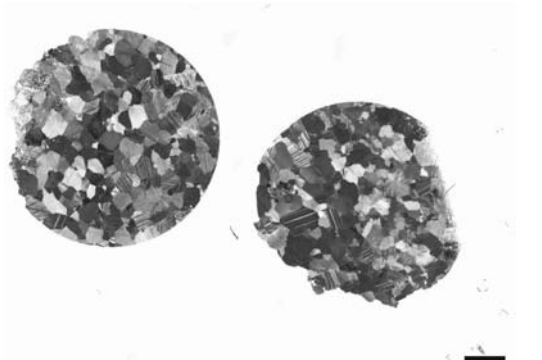


Abbildung 280: S&W-Aufnahme von Dünnschliff des archaischen Kapitells von Didyma ohne erkennbare Dolomitlegen, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Merkmal, das häufiger bei den Milet-Ost-Steinbrüchen auftritt, aber auch bei denen von Milet-West, mit denen Korngrößen und Formen besser korrespondieren.

Die Abbildung 280 ohne Dolomitlegen belegt, wie wichtig es sein kann, für eine korrekte Ansprache hinreichende Mengen an Probenmaterial zur Verfügung zu haben. Die anderen geochemischen Merkmale sprechen ebenfalls eher für Milet-West.

7.5.3 Di3) Archaischer Kouros (ZO MTW?)

Der Marmor des archaischen Kouros von Didyma (Sk 1749) zeigt im Dünnschliff einzelne deutlich gelängte Calcitkristalle.

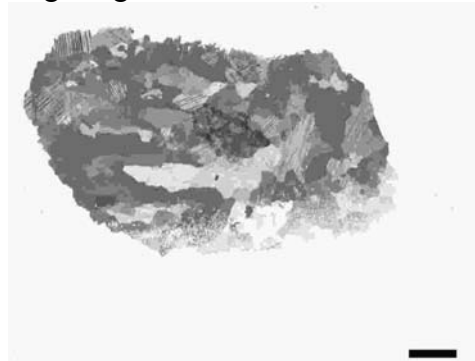


Abbildung 281: S&W-Aufnahme von Dünnschliff des archaischen Kouros von Didyma mit großen gelängten Calcitkristallen, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Isotopie und sonstige geochemische Daten weisen Übereinstimmungen mit dem Mantelträger von Myus (Kapitel 7.4.1) auf, von dem jedoch nicht hinreichend Material für Dünnschliffe zur Verfügung stand, sowie insbesondere wegen der Verarmung schwerer O-Isotopen mit der Lagerstätte vor der Insel Kahve Adasi der Milet-West-Brüche (Isotopendiagramm Abbildung 242), an deren Dünnschliffen auch ansatzweise Kornlängung beobachtet werden kann. Der Unterschied in den Messwerten für Dolomit (2 Gew%) und Mg (0,36 Gew%) deutet auf eine ungleichmäßige Dolomitverteilung hin. Angesichts der maximalen Korngrößen zwischen 2-4 mm, die eher für Herakleia sprechen, könnte es sich um einen Marmor aus einem Übergangsbereich zwischen dieser Lagerstätte und der von Milet West handeln. Es zeigen sich auch geochemische Übereinstimmungen mit Marmoren von Priene und Burgass Adasi, denen aber u.a. die auffällige Kornlängung fehlt. Allerdings sind trotz der bei MyLS28 beobachteten Kornlängung die Merkmale insgesamt zu unterschiedlich, um sie als Marmorquelle in Frage kommen zu lassen.

7.5.4 Di4) Frontsäule Dodekastyllos (ZO Thasos-Aliki)

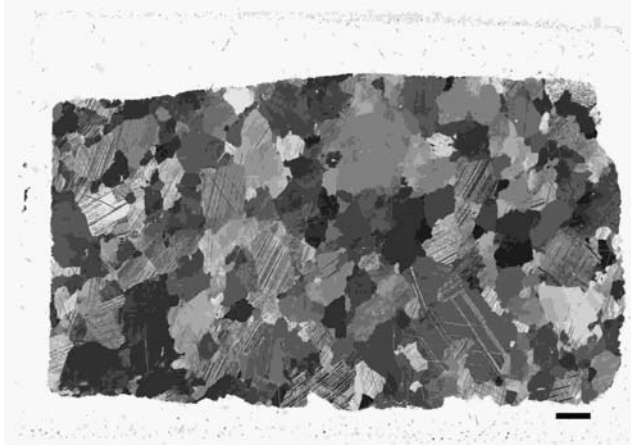


Abbildung 282: Grobkörniger thasischer Marmor der Frontsäule des Dodekastyllos, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Schon bei früheren Untersuchungen (GERMANN 1981) fiel eine grobkörnige Marmorvariante auf, die zunächst nicht zugeordnet werden konnte. Da unterdessen auch Probenmaterial von Thasos-Aliki zur Verfügung stand, bestand schon rein äußerlich kaum ein Zweifel am Import thasischer Marmore zur Römerzeit für die Frontsäule des Dodekastyllos im Athenatempel von Didyma. Die Eigenschaften der nun auch geochemisch untersuchten Probe werden im Kapitel 6.2 über Thasos allgemein und im Kapitel 7.7.15 über den Tempel R in Pergamon detailliert vergleichend beschrieben. Auch andere Autoren bestätigen die thasische Herkunft des Dodekastyllos-Marmors (BORG & BORG 2002a).

7.5.5 Di5) Naikos Apollontempel (ZO HK, MTW)



Abbildung 283: Naikos von Didyma im Berliner Museum

In die Untersuchung wurden sowohl das Antenkapitell eines Museumsstücks (Abbildung 283) als auch ein 1980 als herakleiotisch (GERMANN 1981; PESCHLOW-BINDOKAT 1981) charakterisiertes Architravfragment⁷¹ des Naikos einbezogen. Da sämtliche Messwerte beider Stücke praktisch identisch sind, kann von einer gemeinsamen Marmorlagerstätte ausgegangen werden.

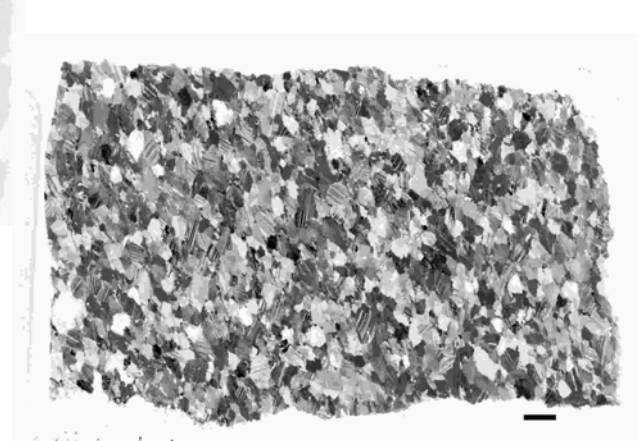


Abbildung 284: Fein-mittelkörniger Marmor des Naikos, N+, Maßstabsbalken 2 mm

An den Fragmenten des Naikos im Museum sind in dem weißen, mittelkörnig-homogenen (MGS 2, AGS 1 mm) Marmor auch dunklere Flecken erkennbar, jedoch keine dolomitischen Einschlüsse. Letzteres wird auch durch die niedrigen Mg-Werte (0,09 Gew%) bestätigt. Auch die sonstigen Spurenelementgehalte sind sehr gering. Die 4 Isotopenproben liegen sehr eng beieinander. Zwischen den früheren und jetzigen Messwerten am Architrav besteht eine gute Übereinstimmung (Mg 0,13/0,09 Gew%, Sr 23/45, Fe 22/15, Mn 13/6 ppm).

Isotopisch und geochemisch lässt sich keine klare Differenzierung zwischen den grobkörnigeren Milet-West- und den feinkörnigeren weißen Herakleia-Marmoren ausmachen, wengleich eine größere Nähe zu den Milet-West-Brüchen besteht. Auch der Vergleich der Handstücke legt diese Annahme nahe. Angesichts der Schwierigkeit in der Unterscheidung beider Marmorvarianten, der MGS bis 2 mm, der früheren am gesamten Bauwerk vorgenommenen Charakterisierungen sowie der beachtlichen Mengen an benötigtem Baumaterial wird aber

⁷¹ „Ein Teil (des Marmors)... kommt höchstwahrscheinlich aus den Bucakbrüchen, das ließ sich am Naikos und an den Cellawänden beobachten.“ (Nr. 91 Probe DY 12, Naikos, Architrav) (PESCHLOW-BINDOKAT 1981, S. 212).

insgesamt einer herakleiotischen Herkunft der Vorzug gegeben. Jedoch ordnet die Diskriminanzanalyse die Naiskosproben den Milet-West-Brüchen zu.

Einen weiteren Hinweis könnte sein Herstellungszeitraum liefern, der zwischen Anfang und das 3. Viertel des 3. Jh. v.u.Z. datiert wird (RUMSCHEID 1994).

7.5.6 Di6) Steingarten an N-Seite (Werkplatz) (ZO MTO)

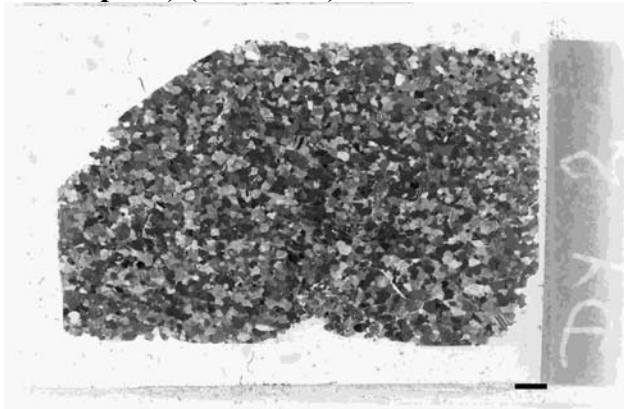


Abbildung 285: Feinkörniger Marmor von Fragment aus dem Steingarten, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Auch diese Probe (Dy2) vom Werkplatz unterhalb der 6. östlichen Säule wurde schon früher untersucht und allgemein den milesischen Brüchen zugeordnet (GERMANN 1981). Methodologisch interessant ist die im Vergleich zum Naikos noch bessere Übereinstimmung der damaligen und jetzigen geochemischen Daten (Fe 30/35, Mn 8/6,8, Sr 140/130 ppm). Die Differenz der Mg-Werte (0,6/0,3 Gew%) ist für sich schon ein Hinweis auf ungleiche Dolomitverteilung. Sie wie auch die Feinkörnigkeit und sämtliche sonstigen geochemischen und Isotopiedaten sind charakteristische Merkmale der Milet-Ost-Brüche.

7.6 Magnesia/Mäander (Mg)

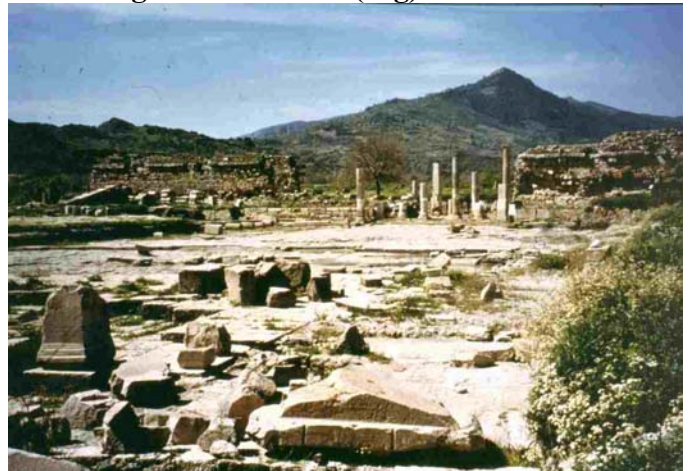


Abbildung 286: Das antike Magnesia



Abbildung 287: Aufgestellte Teile des Artemistempels von Magnesia im Pergamonmuseum

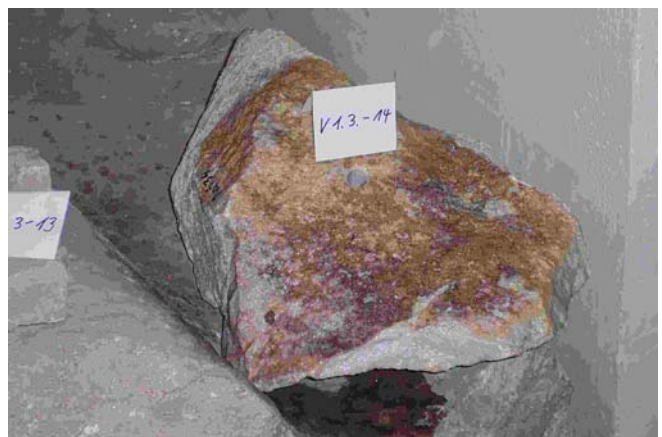


Abbildung 288: Beprobte Simaecke des Magnesia-Artemistempels im Archiv des Pergamonmuseums



Abbildung 289: Magnesia, Säulenkapitellvolute mit gelblichem Rand im Archiv des Pergamonmuseums



Abbildung 290: Beprobte Magnesia-Altarplatte des Artemistempels im Archiv des Pergamonmuseum

7.6.1 Architekturfragmente vom hellenistischem Artemistempel

Der recht lange Zeitraum der Errichtung des Artemistempels in Magnesia (s. Karte Abbildung 17) und seines Altars (detailliert in Kapitel 7.6.2) wird auch in Hinblick auf die Beteiligung von Hermogenes kontrovers mit einer Frühdatierung um 220-205 v.u.Z. und einer Spätatierung um 150-130 v.u.Z. diskutiert (vgl. HERKENRATH 1902; GERKAN 1929; ÖZGAN 1982; RUMSCHEID 1994; WEBB 1996; BINGÖL 1998; Kästner in KNITTLMAYER & HEILMEYER 1998b, S. 228). Jedoch scheint Einigkeit darüber zu bestehen, dass das alte Artemision aus Kalkstein errichtet wurde, das neue Artemision hingegen aus Marmor. So schreiben KOHTE *et al.* (1904, S. 34): "...der verwendete Marmor ist ein harter derbkörniger bläulicher Stein, ähnlich dem der Bauwerke von Priene und Pergamon". Kaum aussagekräftiger ist HAMIAUX (1988): "un marbre gris très clair à grains moyens, recouvert maintenant d'une patine beige."

Auf dem Gelände des antiken Magnesia (Abbildung 286) läßt sich die Verwendung ver-

schiedener Marmore beobachten. Die meisten sind fein- bis mittelkörnig, weiß bis hellgrau und oft mit einer unregelmäßigen grauen Streifung versehen. Häufig sind auch dolomitische Bänder erkennbar. Es kommen aber auch gleichkörnige weiße Marmore mit regelmäßigen MGS um 4 mm vor. Insbesondere zwischen Altar und Propyläon ist der Boden mit Kalksteinplatten belegt, von denen mehrere Inschriften enthalten. Eine 7x7 m große Fläche sticht aus dem vorwiegend weislichen Farbeindruck der gesamten Anlage hervor: sie ist mit farblich auffälligen Platten aus (Hornblende-) Chlorit-schiefern, Glimmerschiefern und Glimmermar-morblöcken belegt.

Die vor Ort erkennbare Variationsbreite der Marmore kommt auch bei den untersuchten Museumsstücken des Artemistempels zum Ausdruck. Allerdings sind durch die starke Versinterung der Oberflächen infolge Jahrhunderte währendender Lagerung im feuchten Schlamm – ein Schicksal, das der Tempel mit zahlreichen Objekten in Überschwemmungsgebieten wie in Milet teilte – die äußerlichen Variationen an den unrestaurierten Museumsobjekten im Depot der Antikensammlung zunächst nicht leicht erkennbar. So ist in eine Säulenkapitellvolute (Abbildung 289) die Wasserfront bis zu 2 Zentimeter tief in das Material eingedrungen, ohne – abgesehen von einem durch gelbliche Eisenoxide markierten Saum – sichtbare Veränderungen hervorgerufen zu haben. Erst die Entnahme von Bohrkernen und die Untersuchung einiger Fragmente erlaubten einen tieferen Einblick (s.a. Tabelle 32).

Sima wie auch Kapitell bestehen aus äußerlich unterschiedlich erscheinenden Marmoren mit unregelmäßigen Hell- und Dunkelfärbungen. Trotz der petrographischen Variationen dürften beide aber aus Marmor eines antiken Steinbruchs im Aydin-Gebirge 20 km nördlich von Magnesia errichtet worden sein (Abbildung 299). Einige Indizen lassen allerdings auch die teilweise Verwendung von ephesischen Kursak-Marmoren nicht ausschließen. Demgegenüber sprechen die Merkmale der Altarplatte für eine Herkunft vom Ostufer des Bafasees aus den Brüchen von Herakleia oder Milet West. Die Verwendung eines grobkörnigen hellen Marmors (MagDorf, Abbildung 297), der heute zusammen mit grauen Marmoren unmittelbar bei

Magnesia vermutlich für Strassensplittherstellung abgebaut wird, ist unwahrscheinlich.

Das einheitlichste Bild ergibt sich bei der Isotopie der **Sima**, deren – auch zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Isotopenanalyse und Variationen innerhalb verschiedener Fragmente

des gleichen Architekturwerksteins gemessenen – 15 δC -Werte zwischen 4,4 und 4,7 im Bereich parischen Lychnites oder ephesischer Marmore liegen (Abbildung 291). Einheitlich sind auch die Verteilungsmuster der SEE (Abbildung 292): ΣSEE 2,3-5,5, $\Sigma SEE/Y$ 0,87-1,3, Cer_{neg} 0,21 bis 0,26.

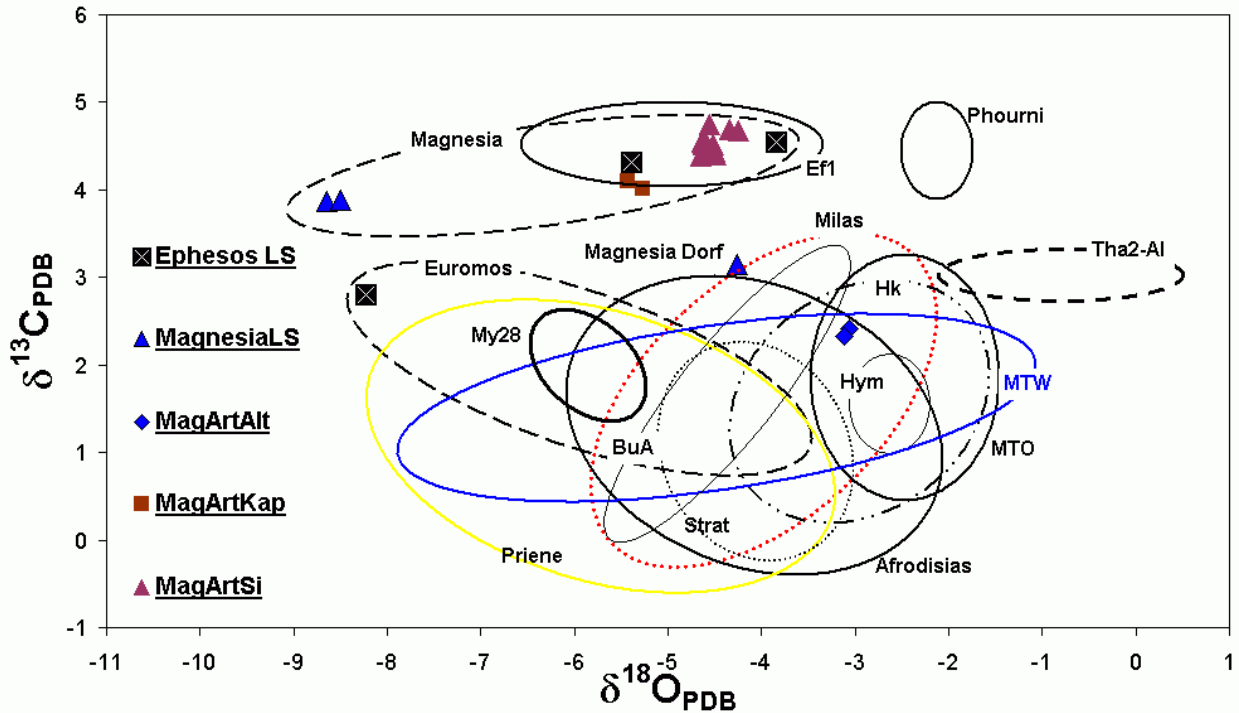


Abbildung 291: Isotopie von Marmoren des Artemistempels von Magnesia, Magnesia Lagerstätten und Ephesos Kursak

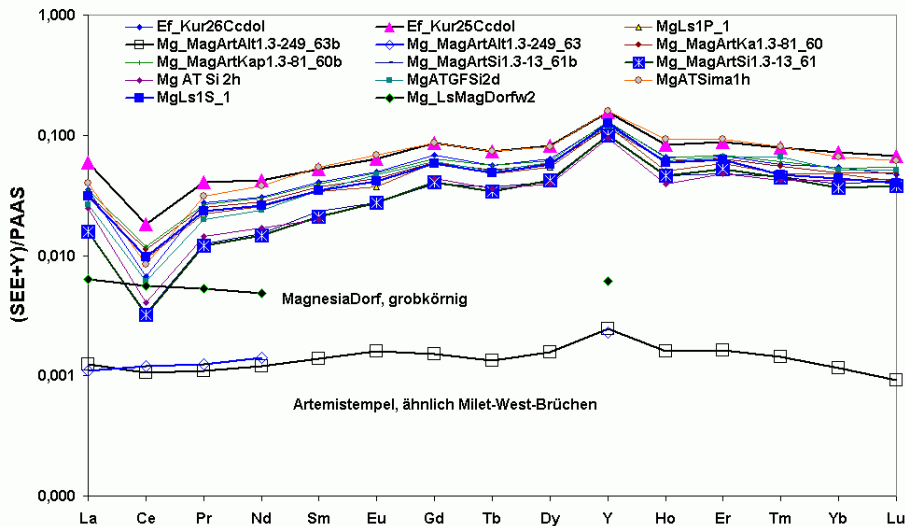


Abbildung 292: SEE der Magnesia-relevanten Marmore. Architekturteile, MgLs und Ephesos-Kursak weisen ähnliche Verteilungsmuster auf, anders die anstehende Marmorsteinbruchprobe. Die Altarprobenwerte ohne negative Cer-Anomalie entsprechen besonders denen der Milet-West-Marmore (vgl. Abbildung 157)

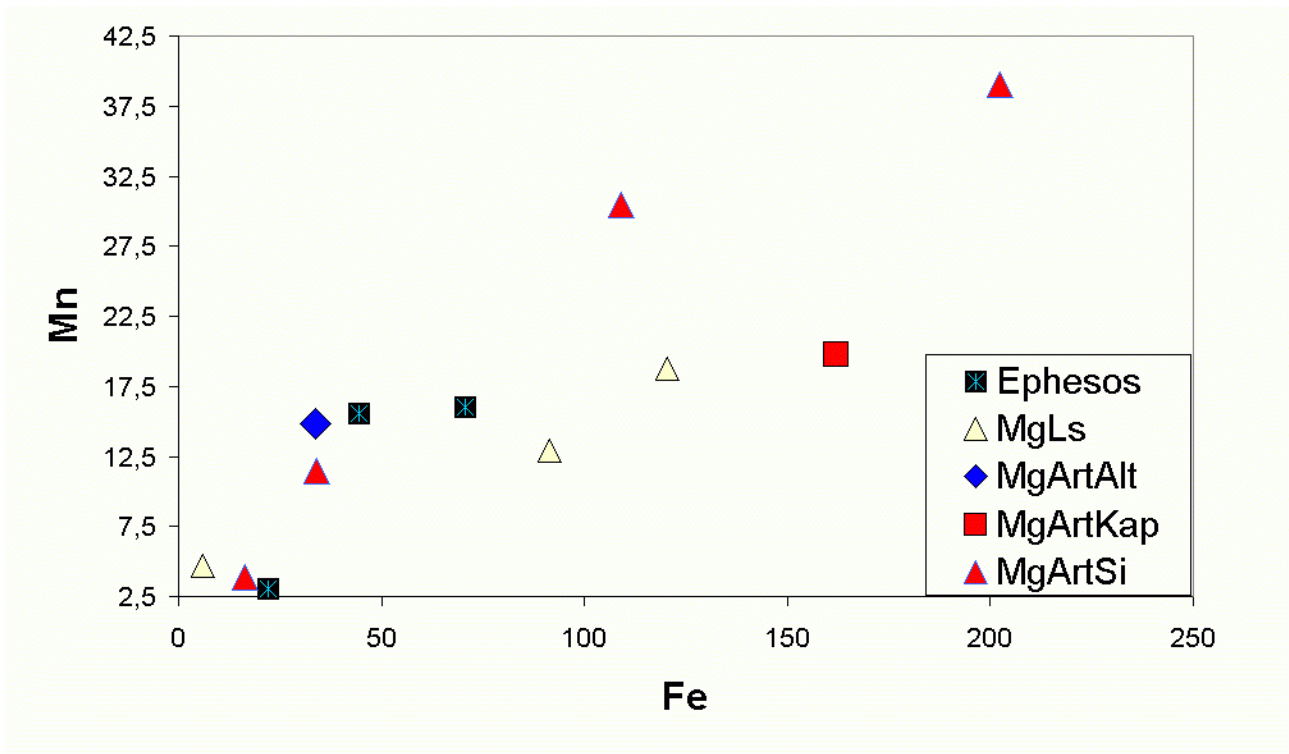


Abbildung 293: Fe/Mn der Magnesia-relevanten Marmore

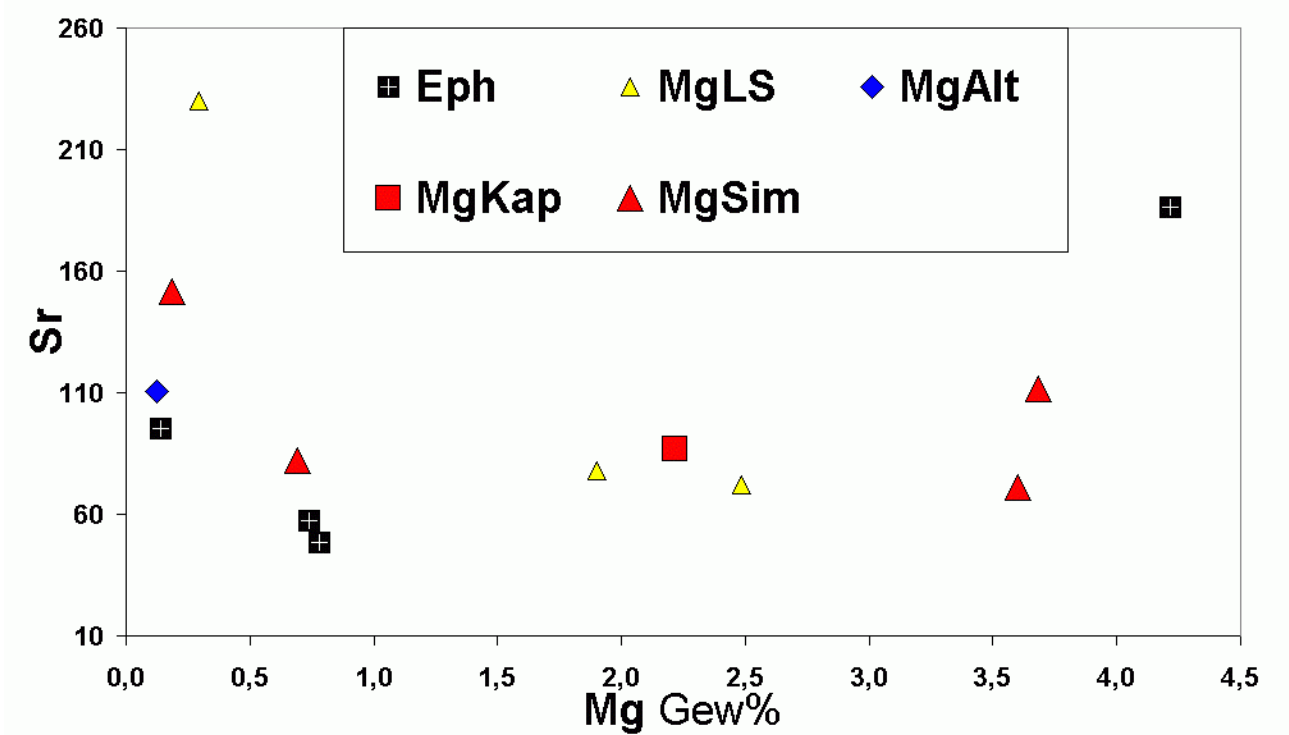
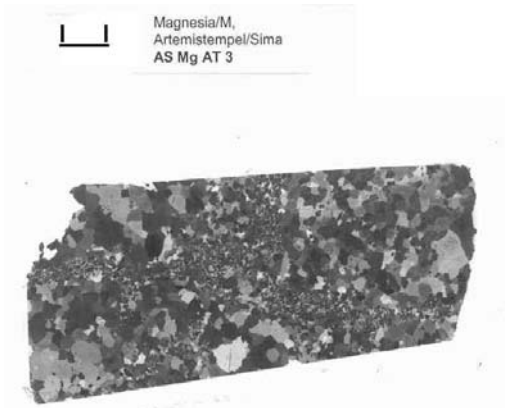


Abbildung 294: Mg/Sr der Magnesia-relevanten Marmore

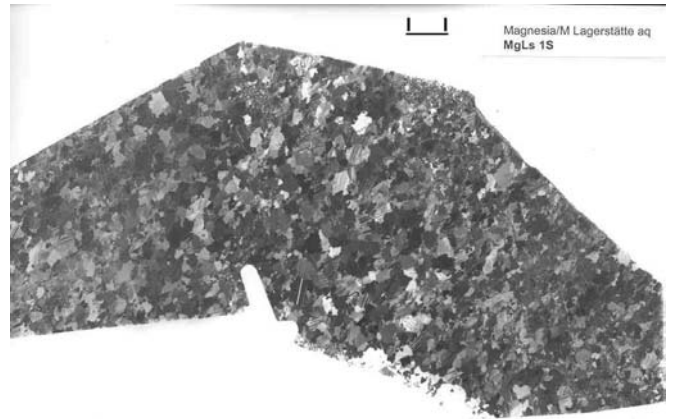
Trotz dieser geochemischen Homogenität weist die Sima sowohl eine weißgräuliche, feinkörnige als auch eine hellweiße grobkörnige Variante auf, daneben häufig Übergangsbereiche, in denen feinkörnige dolomitische Lagen die mittel- bis grobkörnige Calcitmatrix unregelmäßig durchziehen.

Das **Kapitell** besteht aus einem homogen feinkörnigen (0,5-0,75 mm) grauweißen Marmor

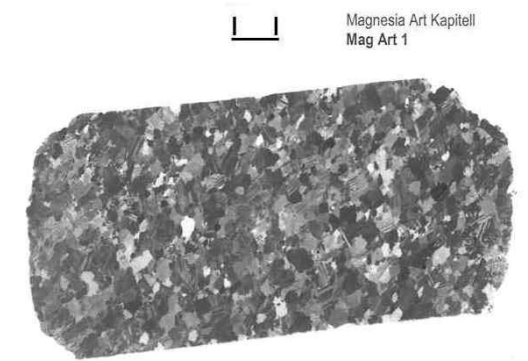
(Abbildung 298b), der eine nur geringfügig leichtere isotopische Zusammensetzung als die Sima aufweist (δC um 4,1, δO um -5,2), die auch als lösungsbedingte Verarmung interpretierbar ist. Das SEE-Verteilungsmuster ist ebenfalls ähnlich (ΣSEE 4,5 - 4,8, $\Sigma SEE/Y$ 1,4, Cer_{neg} 0,39, Y/Ho um 100, vgl. Abbildung 292). Die geochemischen und Isotopiewerte (bei auffällig hohem δC) sprechen für eine gemeinsame



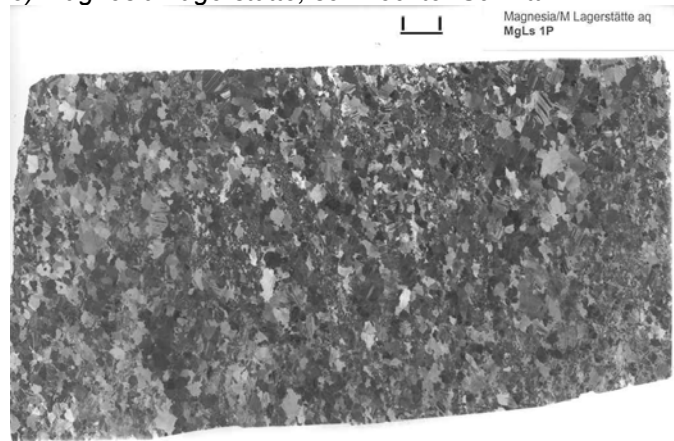
a) Sima-3, hell-streifig



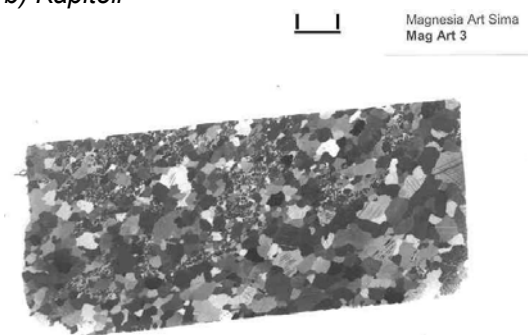
e) Magnesia Lagerstätte, senkrechter Schnitt



b) Kapitell



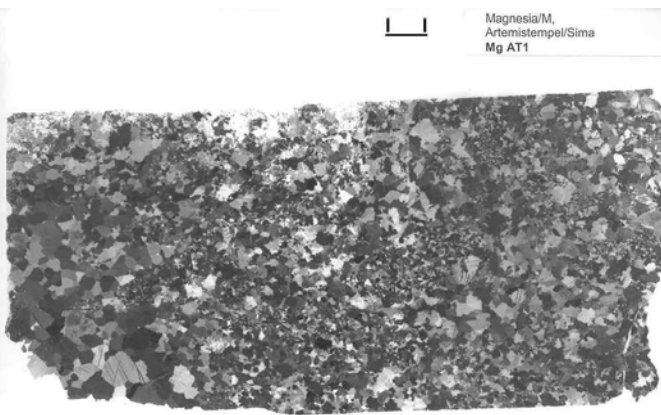
f) Magnesia Lagerstätte, paralleler Schnitt



c) Sima-3b, hell-streifig



g) Altarplatte



d) Sima-1, hell-streifig

Abbildung 298: Dünnschliffaufnahmen von Architekturteilen (a-d) und Altar (g) des Artemistempels in Magnesia sowie von der 20 km nördlich gelegenen Lagerstätte MgLS (e-f), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Schon äußerlich ähneln die meisten (nicht hellweißen) Proben der Architekturfragmente zwei Marmorhandstücken des Steinbruchs nördlich von Magnesia, der auch antike Abbauspuren aufweist (Abbildung 299).

Unter dem Mikroskop zeigt sich die charakteristische schlierenartige Verteilung des Dolomits (7-11 Gew% XRD, Mg 1,9-2,4 Gew%), die MGS liegen zwischen 1,4-1,6 mm, das Korngefüge mit gezahnten Korngrenzen ist heterogen (AGS um 0,5 mm). Von einigen opaken Nestern (darunter Hämatit) abgesehen, sind nur ein Quarzkorn je Dünnschliff und keine Glimmer zu finden. Wie bei Kapitell und Sima treten vermehrt einscharige Zwillingslamellen auf. Gleichmäßig feinverteilte submikroskopische Einschlüsse beschränken sich meist auf die größeren Calcitkörner, während die kleineren Körner unter dem Mikroskop klar erscheinen. Auch ist allen Proben beim Zerreiben ein schwacher Geruch nach faulen Eiern gemeinsam. Ebenso stimmen die sonstigen geochemischen Kennwerte gut überein.

Den prägnantesten Unterschied zwischen Architekturfragmenten und Magnesia-Lagerstättenproben weist die Sauerstoffisotopie auf (δO -8,49 bis -8,65). Die relativ schwere Kohlenstoffisotopie (δC 3,87-3,88) liegt nur knapp 0,2 Promille unter der der Kapitellproben. Es ist durchaus plausibel anzunehmen, dass die zur Verfügung stehenden Proben nur ein kleines Spektrum der Eigenschaften (auch petrographisch) der gesamten Magnesia-Lagerstätte wiedergeben, und sich hier eine auch bei anderen Marmorlagerstätten beobachtbare Verarmung insbesondere der schweren Sauerstoffisotopen – sei es verwitterungsbedingt, sei es lagerstätteninhärent – ausdrückt. Deshalb kann aufgrund der petrographischen und geochemischen Merkmale – einschließlich der eher isotopischen Kongruenz – sowie der antiken Abbauspuren die Verwendung dieser Marmore für die Architekturteile des Artemistempels als wahrscheinlich angenommen werden. Dies entspricht auch der Ansicht des Restaurators Christian Kronewirth, der die Brüche und das antike Magnesia gut kennt und dankenswerterweise die Steinbruchproben zur Verfügung gestellt hat.

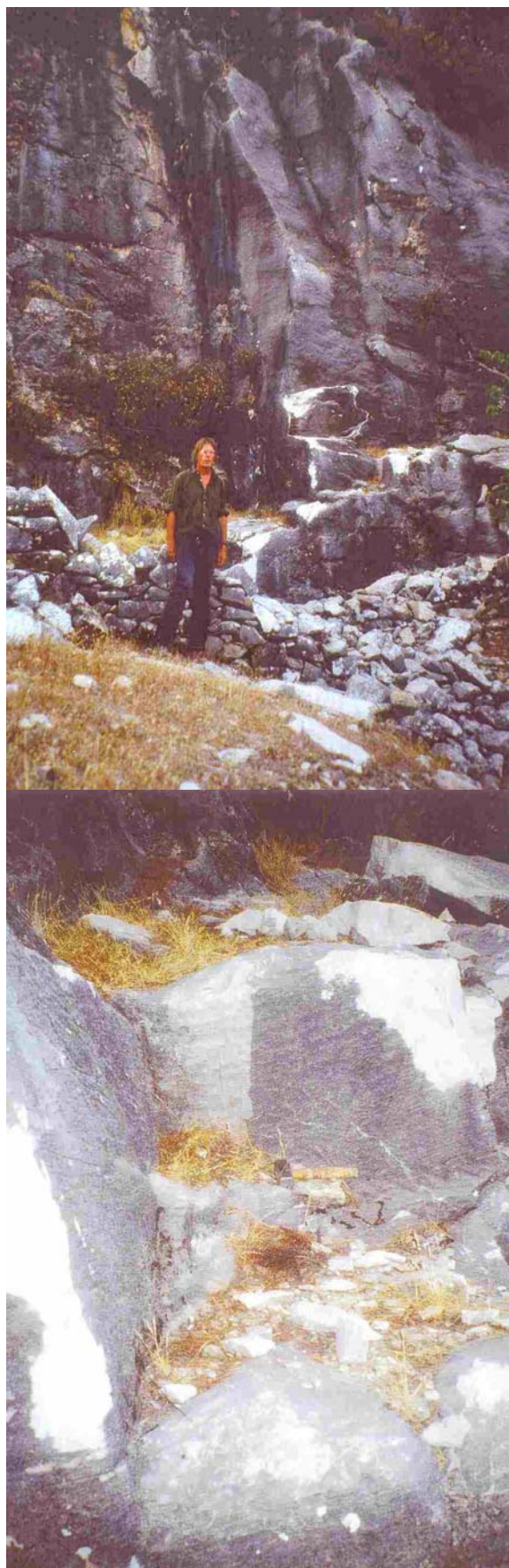


Abbildung 299: Antiker Marmorsteinbruch bei Magnesia. Oben Ch. Kronewirth, von dem das Probenmaterial und die Fotos stammen. Unten: durch Dolomit hervorgerufene feine subhorizontale Lagen

7.6.2 Relieffragment vom Altar des Artemisions

Deutlich unterschiedlich sind demgegenüber die Merkmale des **Altars** (Abbildung 290), der zwischen 221-220 v.u.Z. datiert wird. Von ihm konnte lediglich ein weißes Fragment mit gelblichem Farbton untersucht werden. Ob diese auch in der Literatur⁷² beschriebene Gelbfärbung eine Folge der Lagerung im Wasser oder ein spezifisches Merkmal des Marmors ist, läßt sich nicht feststellen. Mit einer MGS von 3 mm und einer AGS von 2 mm ist er mittelkörnig mit einem homogenen Gefüge bei deutlich abgesetzten geraden bis buchtigen Korngrenzen (Abbildung 298 g). Er weist eine gewisse Kornlängung und viele dünne Zwillingslamellenscharen auf. Dolomit und opake Komponenten fehlen, ansonsten ist nur sehr wenig Quarz und Glimmer vorhanden. Trotz der Gelbfärbung wurden lediglich 34 ppm Fe gemessen, daneben 15 ppm Mn und 111 ppm Sr. Auffällig ist das Verteilungsmuster der SEE (Abbildung 292): niedrigen Gehalten (Σ SEE um 0,2ppm) stehen ein hohes Σ SEE/Y Verhältnis um 3,2 und das Fehlen einer negativen Cer-Anomalie gegenüber.

Die Altarprobe weist Übereinstimmungen mit Marmoren am Bafa-See auf, besonders den Brüchen von Herakleia und Milet West. Dies gilt für die Petrographie, die Isotopie (die allerdings im Überlappungsfeld vieler weiterer Lagerstätten liegt), teilweise die SEE-Verteilungsmuster und die sonstigen Spurenelemente (besonders mit der Probe MT-W_G6_MT49). Die Diskriminanzanalyse stützt eine Herkunftsangabe aus den Herakleia-Brüchen. Es kann nicht eindeutig entschieden werden, ob der Altarmarmor tatsächlich aus der Bafa-See-Region stammt oder aus einer anderen Lagerstätte. Genauere Aussagen lassen sich erst nach einer systematischen Beprobung der Steinbrüche in der Umgebung von Magnesia treffen.

Der heute in Abbau befindliche kleine Marmorsteinbruch in der Nähe von Magnesia bei Gümüşköy mit hellen und dunkelgrauen Varianten weist keine antiken Abbauspuren auf, die einheitliche und schlechte Qualität des klein-

klüftigen Gesteins läßt zudem eine Verwendung für antike Architekturteile oder gar den Altar unwahrscheinlich erscheinen. Die nicht sehr umfangreichen weißen Marmorvarianten sind grobkörniger (MGS bis 4 mm, AGS um 1 mm), und enthalten mehr akzessorische Mineralien, besonders nestartig angehäufte große Glimmer und opake Mineralien. Schon beim Zerkleinern strömt er einen intensiven Geruch nach H₂S aus. Andererseits sind die erfaßten Gehalte an Fe (6 ppm) und Mn (3,6 ppm) gering, lediglich Sr (220 ppm) ist höher. Der niedrige Mg-Meßwert (0,3 Gew%) bestätigt die Abwesenheit von Dolomit. Die niedrigen SEE-Gehalte zeichnen sich durch das Fehlen einer negativen Cer-Anomalie und deutliche Verarmung von Y aus (gerader Kurvenverlauf in Abbildung 292).

Auch die zwischen der des Altars und den Architekturteilen liegende Isotopie ist deutlich unterschieden und unterstreicht die Annahme, dass zwar weiter entfernt liegende, aber qualitativ höherwertige Marmore verwendet wurden.

Mit großer Wahrscheinlichkeit kann davon ausgegangen werden, dass der Altarmarmor des Artemistempels von einer anderen Lagerstätte – wahrscheinlich am Bafa-See – stammt als Sima und Kapitell. Aber erst eine systematischere Geländeinspektion und Auswertung unter Einschluss der ephesischen Brüche wird Gewissheit über die Herkunft geben können.

⁷² Beschreibung des Marmors der Gewandstatuen im Museum von Aydin: „weißer bis hellgelblicher Marmor mit großen Kristallen.“ (ÖZGAN 1982)

		Herakleia	Milet West	Mag ArtAltar	Eph-Kursak	MagLS	Mag ArtKapitell	Mag ArtSima
MGS1	Min	1,60	,60	3,00	3,40	1,40	1,20	1,60
	Median	2,90	2,60	3,00	3,60	1,60	1,20	2,20
	Max	4,60	4,00	3,00	3,80	1,60	1,20	3,50
MGS2	Min	1,40	,40	2,80	3,20	1,40	1,00	1,60
	Median	2,60	2,40	2,80	3,50	1,60	1,00	1,60
	Max	3,60	3,40	2,80	3,80	1,60	1,00	3,00
AGS1	Min	,69	,28	,83	1,33	,53	,42	,40
	Median	1,00	,79	,83	1,67	,61	,42	,61
	Max	1,33	2,00	,83	2,00	,61	,42	1,00
AGS2	Min	,34	,26	,77	1,00	,43	,40	,19
	Median	,80	,67	,77	1,50	,43	,40	,43
	Max	1,05	1,00	,77	2,00	,53	,40	1,00
ΣSEE	Min	,08	,17	,20	4,57	4,23	4,58	2,36
	Median	,38	,52	,21	5,92	4,25	4,74	2,83
	Max	13,17	7,62	,22	7,27	4,27	4,90	5,58
ΣSEE/Y	Min	,24	,65	3,16	1,33	1,25	1,39	,87
	Median	1,16	1,57	3,21	1,53	1,29	1,43	1,10
	Max	3,96	4,53	3,26	1,72	1,32	1,48	1,31
La/Ce	Min	,65	,50	,44	1,57	1,55	1,39	2,08
	Median	1,05	,84	,50	2,07	1,61	1,40	2,28
	Max	1,42	2,48	,56	2,57	1,66	1,41	2,92
Ce _{neg}	Min	,41	,24	,91	,21	,34	,39	,21
	Median	,56	,57	,97	,29	,35	,39	,24
	Max	,68	,98	1,03	,36	,36	,39	,26
Y/Ho (mol)	Min	66,31	67,10	78,50	94,52	107,82	95,02	85,99
	Median	132,32	93,89	78,50	95,99	112,50	98,01	107,73
	Max	153,86	127,50	78,50	97,46	117,19	101,01	121,82
Dolomit Gew%	Min	,00	,00	,00	1,61	7,49	1,83	1,84
	Median	,00	,00	,00	2,64	9,18	1,97	4,35
	Max	5,11	2,25	,00	3,67	10,87	2,10	25,00
Mg Gew%	Min	,03	,04	,13	,74	1,90	2,22	,19
	Median	,09	,18	,13	,76	2,19	2,22	2,15
	Max	1,29	5,93	,13	,78	2,49	2,22	3,68
Fe	Min	9,53	10,91	33,84	44,42	91,47	161,97	16,28
	Median	17,72	50,11	33,84	57,48	105,95	161,97	71,64
	Max	52,96	147,21	33,84	70,54	120,44	161,97	202,24
Sr	Min	44,52	41,68	110,55	48,67	72,24	86,78	71,24
	Median	63,59	100,80	110,55	53,14	74,94	86,78	96,83
	Max	225,80	142,71	110,55	57,60	77,65	86,78	151,38
Fe/Sr	Min	,06	,16	,31	,91	1,18	1,87	,11
	Median	,29	,47	,31	1,07	1,42	1,87	,70
	Max	1,00	2,62	,31	1,22	1,67	1,87	2,84
Mn	Min	2,50	2,50	14,81	15,58	12,87	19,80	3,88
	Median	5,42	6,52	14,81	15,82	15,81	19,80	20,96
	Max	9,81	17,81	14,81	16,05	18,75	19,80	39,02
δO	Min	-7,19	-7,55	-3,12	-3,84	-8,65	-5,43	-4,65
	Median	-3,41	-3,38	-3,09	-3,84	-8,57	-5,35	-4,58
	Max	-1,81	-1,23	-3,06	-3,84	-8,49	-5,26	-4,25
δC	Min	,64	,64	2,33	4,54	3,87	4,02	4,38
	Median	1,83	1,45	2,37	4,54	3,88	4,05	4,52
	Max	3,38	2,44	2,41	4,54	3,88	4,09	4,74

Tabelle 32: Kennwerte der Marmore vom Artemistempel (Altar, Sima, Kapitell) und von den Lagerstätten bei Magnesia, Herakleia, Milet West und Ephesos Kursak

7.7 Pergamon: Hellenistische und römische Großprojekte

Auch wenn Pergamon (siehe Karte Abbildung 16) vor allem mit dem Zeusaltar und seinen Friesen verbunden wird, hat es von der archaischen und hellenistischen über die römische bis zur byzantinischen Epoche zahlreiche weitere bedeutende sakrale und weltliche Anlagen hervorgebracht. Sie sind Gegenstand intensiver Forschung, und die Ausgrabungen unter Leitung des DAI sind noch keineswegs abgeschlossen. Einen umfassenden Überblick liefert RADT (1999). Da eine knappe Darstellung zentraler historischer Daten bereits erfolgt ist (CRAMER 1998) und weitere Informationen ohne Weiteres zugänglich sind, wird hier auf eine Wiederholung verzichtet. Eine Vorstellung von der Ausdehnung des pergamenischen Königreichs gibt Abbildung 2 auf S. 14, wo sich auch ein Foto des Pergamonaltars im Berliner Museum gezeigt wurde.

Akropolis und antike Stadtanlage sind in leicht verteidigbarer Lage auf dem Gipfel eines vulkanischen Kegels am Fuß des Kaikosflusses erbaut worden. Ein Gesamtplan der antiken Ausgrabungsstätte ist in Abbildung 315 dargestellt. Die Beschreibung der untersuchten Objekte erfolgt weiter unten.



Abbildung 300: Blick von der Akropolis nach Norden auf Selinustal und Kozak. Links im Bild vulkanische Kuppe

Zunächst wird ein Überblick über die geologische Gesamtsituation sowie die potentiell zur Verfügung stehenden Gesteine gegeben.

7.7.1 Geologische Situation Pergamons und infrage kommende lokale Gesteine

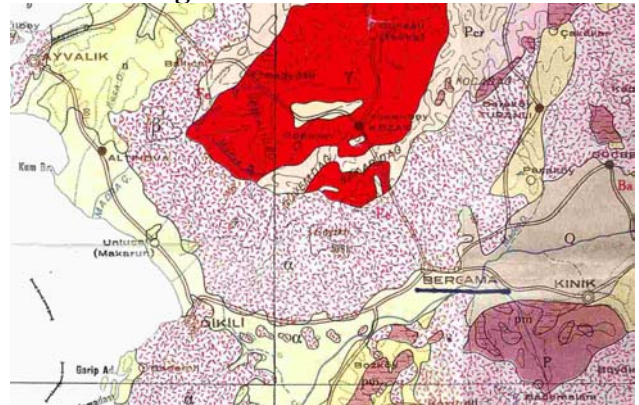


Abbildung 301: Ausschnitt aus geologischer Karte von Pergamon und dem Kozak (MADEN TEKTİK VE ARAMA 1964)

Die Region von Bergama-Kinik-Soma gehört strukturell der Südflanke der Nordanatolischen Schwelle des ungefähr Ost-West verlaufenden variszischen Gebirges an. Gleiches gilt auch für die Insel Lesbos (s. Kapitel 6.3). "Diese Kernzone zeichnet sich durch epizonale Metamorphite, lebhaften geosynklinalen Diabasvulkanismus und granodioritische Intrusiva aus. Phyllite, Quarzite, Marmore, Grünschiefer sind verbreitet, aber infolge der Durchbewegung ihres Fossilinhalts verlustig gegangen. Allerdings ließ sich bisher nicht streng nachweisen, dass diese Schiefer wirklich metamorphes Altpaläozoikum darstellen." (BRINKMANN 1976).

In der Umgebung Pergamons findet sich zumindest teilweise die folgende lithologische Sequenz (Tabelle 33):

Mächtigkeit (m)	Gesteine	Alter
500	Andesite und Tuffe	Unt. Pliozän
100	Süßwasser-Mergel, Kalk- und Sandsteine, Konglomerat	Ob. Miozän
500	helle, dicke Kalksteinbänke mit basalen, grauen, sandigen Kalksteinen	Ob. Jura
300	Dunkle, feinkristalline, gutgeschichtete fusuline und algale Kalke mit zwischengeschalteten Sandsteinen	Ob. Perm
1000	Grauwacken und Schiefer mit Radiolariten und Diabas-Intrusionen	Unt. Perm - Ob. Karbon
	Phyllite	(?) Präkambrisch

Tabelle 33: Lithostratigraphie in der Umgebung von Pergamon (BRINKMANN & IZDAR 1971)

Spättertiäre Laven und Tuffe dominieren das Gesamtbild. Ihre Zusammensetzung ist hauptsächlich andesitisch und reicht über Latit bis Dazit. Vom Hangenden zum Liegenden lassen sich vier Einheiten unterscheiden (AGDEMIR 1997):

- Yuntdağ-Vulkanite III: albitisierter Biotit-Hornblende-Andesit, teilweise auch als Dazit und Rhyolit (Pliozän)
- Yuntdağ-Vulkanite II: Basalte und Pyroxen-Andesite (Pliozän)
- Soma-Formation: Kalkstein und Dolomit mit zwischengeschalteten Tufflagen (Pliozän)
- Yuntdağ-Vulkanite I: Hornblende-Andesite, Biotit-Hornblende-Andesite und albitisierte Andesite (Miozän).

In die miozäne Vulkanitsequenz sind die hydrothermalen Goldlagerstätten von Ovacik (z.B. YILMAZ 2002) und Narlica eingeschaltet. Sie sind an eine 1,6 km lange NW-streichende Bruchstruktur gebunden, die von E-W verlaufenden Gold-führenden Quarz-Adular-Gängen durchschlagen wird. Die Reserven der Lagerstätten vom Adular-Serizit-Typ werden für Ovacik auf 2,9 Millionen Tonnen bei jeweils 9 ppm Au und Ag geschätzt (AGDEMIR 1997). Wegen der Zyanidlaugung und sonstiger Umweltbelastung ist der Abbau dieser beträchtlichen Reserven seit Jahren heftig umstritten.

Die das moderne Bergama überragende Akropolis auf einer vulkanischen Kuppe liegt auf der Südflanke einer domähnlichen Antiklinale mit dem Granitmassiv des Kozaks. Die anstehenden vulkanischen Gesteine, hauptsächlich Andesite, bildeten den bei weitem am Häufigsten eingesetzten Werkstein im antiken Pergamon. Zwischen dem Oberen Oligozän und Unteren Miozän intrudierte im nördlich von Pergamon gelegenen Kozak-Massiv Granit, genauer Granodiorit (AKYUREK *et al.* 1984; ALTUNKAYNAK & YILMAZ 1998). Wahrscheinlich wurden eingeschaltete Kalksteine hierbei kontaktmetamorph in Marmor umgewandelt. Im NW-Kontaktbereich zu den Kalksteinen entstanden Eisenerz-Anreicherungen (Magnetit, Hämatit als Pyrit und Chalkopyrit, daneben Bleiglanz, auf die auch geschürft wurde (Eski Maden = "Altes Bergwerk"). Als Kontaktsilikate treten Andradit und hedenbergitische Hornblenden

auf. Rings um den Granitkomplex schließen Andesite an. Des Weiteren werden Grauwacken, Quarzkonglomerate, Hornblendeporphyre und -granite, Tonschiefer sowie Sandsteine beschrieben (PHILLIPPSON 1911). In den Tälern und Grabenebenen befinden sich quartäre Ablagerungen, insbesondere die Aufschüttungen durch den Kaikosfluss, den heutigen Bakir Çay. Der höchste Gipfel in dieser gebirgigen Landschaft ist der Maja (1341 m).

7.7.2 Kozak (N-Bergama)

Aus Zeitgründen und wegen der Unwegsamkeit des Geländes konnten trotz ortskundiger Führung nur wenige Gesteinsvorkommen im Kozak aufgesucht werden. Der Inhalt des Flussgerölls im Selinus nördlich von Bergama, der Teil des das Kozakmassiv nach Süden entwässernden Flusssystemes ist, bestätigt, dass nur gelegentlich auch Marmorlinsen angeschnitten werden. Die Marmorkiesel in Abbildung 302 wurden auf einer Geröllfläche von 20x10 m zusammengetragen. Geochemisch und isotopisch entsprechen Marmorproben einer feinkörnigeren Variante denen von Eski Maden, die grobkörnigere Variante hingegen den Museumsproben aus den Brüchen von Akkaya (s. Kapitel 7.7.3 ff.).



Abbildung 302: Marmorkiesel im Flussgeröll des Selinus

7.7.2.1 Granodiorite

Charakteristisches Gestein des Kozak-Massivs sind zwischen Oberem Oligozän und Unterm Miozän intrudierte Granodiorite (dunkel ohne Signatur in Abbildung 301), die z.B. im Bereich der Stadt Kozak durch Wollsackverwitterung an der Oberfläche freigelegt sind. Sie können ohne großen Aufwand gewonnen und mit einfachen Mitteln preiswert für den europäischen Markt zu Pflastersteinen etc. weiterverarbeitet werden.



Abbildung 303: Granodioritboulder bei Kozak



Abbildung 304: Abtransport von Granodioritblöcken



Abbildung 305: Weiterverarbeitung von Granodioriten für den Straßenbau

Es ist anzunehmen, dass diese leichte Zugänglichkeit der Granodiorite im gesamten Kozak-

gebiet zu ihrer weiten Verbreitung in der römischen Antike als *marmo misio* oder *granito bigio* (DE VECCHI *et al.* 2000) beitrug. Beispiele fanden sich sowohl in Pergamon als auch auf Lesbos, wobei häufig dunklere Nester (Biotit- und hornblendehaltige Enklaven) auffallen (Abbildung 306).



Abbildung 306: Granodioritsche Säulen auf der Akropolis von Pergamon (oben mit dunklen Nestern) und dem Kastro von Mytilene (unten links)

Ihre Geochemie weist darauf hin, dass die Magmen dem Erdmantel entstammen und mit Krustenmaterial kontaminiert sind. „The cogenetic plutonic rocks, the hypabyssal rocks and the overlying volcanic associations are related to one another in space and time, and appear to have been connected to a shallow level granitic intrusion in a caldera collapse setting. The calc-alkaline magmatic activity waned during the Middle Miocene. When the volcanism was rejuvenated during the Late Miocene-Pliocene, alkaline basalt lavas were formed as fissure eruptions” (ALTUNKAYNAK & YILMAZ 1998).

Nach GALETTI *et al.* (1992) handelt es sich bei untersuchten *marmo misio*-Proben aus dem Kozak allerdings nicht um Granodiorit, sondern um quarzreichen Granit. Bei Ezine gebrochener *marmo troadense* sei ein Quarzmonzonit. Große Mengen von *marmo misio* hätten in Säulen entlang der Via Marmorata in Ephesos Verwendung gefunden.

7.7.2.2 Andesite

Wesentlich schwieriger als bei den Granodioriten ist der Ursprung von antik verwendetem andesitischen Material zu lokalisieren, das in der östlichen Ägäis weit verbreitet ist, aber auch z.B. im peloponnesischen Krokeai als *Grüner Lakonischer Marmor* oder *Porfido Verde Antico* auftritt. Unter Archäologen ist die Ansicht verbreitet, dass in der Antike für Sarkophage verwendete graubraune andesitische Gesteine einer einzigen Quelle entstammen: als dem von Plinius in der *Naturalis Historia*, XXXVI, 131 beschriebenen *lapis sarcophagus* aus Assos, dem heutigen Behramkale im Süden der Troaden (siehe Abbildung 16). Aber wie bereits von LAZZARINI (1994) bemerkt, unterscheiden sich diese Andesite makroskopisch nicht von solchen in Pergamon oder auf Lesbos. Eine mikroskopische und geochemische⁷³ Analyse von Proben aus Assos und Pergamon kennzeichne sie einheitlich als Andesite (wobei die Probe von Pergamon einen leicht dazitischen Charakter aufweisen soll), die infolge kalkalkalinen Vulkanismus entstanden sind.

Dieser Befund Lazzarinis ist keineswegs erstaunlich, da nicht nur rund um die Kozak-Intrusion (Abbildung 301) sondern im gesamten Bereich von Lesbos nach Norden, Osten und Süden kalkalkaline Vulkanite weit verbreitet sind. Sie stehen im engen Zusammenhang mit der infolge der Konvergenz von Afrikanischer und Eurasischer Platte seit dem Oligozän einsetzenden Spannungstektonik, die sich u.a. in den E-W-verlaufenden Grabensystemen Westanatoliens und mehreren Phasen von Inselboğenvulkanismus ausdrückt.

Nach Lazzarini zeigt der *lapis sarcophagus* von Assos eine graubraune, gelegentlich rötlich-graue Farbe. Bei den Andesiten von Pergamon herrscht demgegenüber der rote Farbton vor. Sie bildeten das Hauptbaumaterial in Pergamon. Ob sie exportiert wurden und gar eine Quelle des *lapis sarcophagus* bilden, ist unbekannt. Zumindest konnten wir aber im Hafengebiet von Milet mehrere rötliche Andesitquadere beobach-

⁷³ In Tabelle 40 S. 331 im Anhang sind der Vollständigkeit halber ICP-MS und AAS-Messwerte einer andesitischen Probe nördlich von Bergama angegeben. Sie wurden nicht weiter kontrolliert und unterscheiden sich teilweise um eine Größenordnung von den Angaben Lazzarinis.

ten, die denen von Pergamon sehr ähneln (s. Kapitel 7.3).

7.7.3 Diskussion der lokalen Marmorvorkommen

Dominierend und landschaftsprägend sind in der pergamenischen Landschaft vulkanische Eruptiva und Effusiva, besonders der oben beschriebene Andesit.

Es treten aber neben Kalksteinen (Abbildung 301) auch einige kleinere Marmorvorkommen auf. Wegen ihrer geographischen Nähe zu Pergamon und weil verschiedene Autoren ihre Verwendung in Pergamon postuliert haben (SCHUCHHARDT 1912), war es erforderlich, sie genauer zu untersuchen. Unklar ist, ob zumindest die permischen Kalke regionalmetamorph in Marmor umgewandelt wurden oder ob Kontaktmetamorphose im Zusammenhang mit granitischen Intrusionen oder Subvulkanismus für diese Marmorbildungen ausschlaggebend gewesen sind. Da aber die in der Regel kleinen Marmorvorkommen vor allem in der Nähe des Granitstocks des Kozak auftreten, Kalksteine häufiger sind und auch die in Tabelle 33 dargestellten Gesteinsserien nur schwach metamorph überprägt sind, ist Kontaktmetamorphose der wahrscheinlichere Bildungsmechanismus.

- Nördlich des Kömür Dere wird der weiße Marmorkegel Sakar-Kaja erwähnt.
- In etwa 560 m Höhe liegt der Marmorabbau Eski Maden ("altes Bergwerk"), der auch von uns aufgesucht und beprobt wurde. PHILLIPSON (1911) beschreibt diesen Marmor als bläulichweiß, zerklüftet und ungeschichtet. Auch meint er, an deren SW-Seite alten Steinbruchbetrieb erkannt zu haben. Wie auch bei Sakar-Kaja ist ein Bezug zu in Pergamon verwendeten Marmoren in der Literatur jedoch nicht zu finden.
- Im schwer passierbaren Tal (weshalb wir es nicht aufsuchen konnten) des Ajasmand-Tschai 30 km nördlich von Pergamon befindet sich ein 5 m mächtiges senkrecht stehendes Lager von weißem und blaugestreiftem Marmor. In der Nähe liegt an der Nordseite des Tales ein 40 m mächtiger senkrechter Marmorzug, der den "weißen Fels", Akkaya, hervorbringt, mit einem Streichen von N 60°W.



Abbildung 307: Hang mit ehemaligem Marmorabbau bei Kirkayalar Eski Maden – Kozak



Abbildung 308: Feinkörniger Marmor mit starker Zerklüftung von Kirkayalar Eski Maden

SCHUCHHARDT (1899) berichtet über eine Erkundungsfahrt, der die von uns analysierten Marmorproben entstammen: "...wir hatten den 'Ak-Kaya' erreicht. Gleich die ersten Felsstücke, die wir aufnahmen, zeigten schönen, weisslichen, grosskrystallinischen Marmor; andere zeigten bläuliche Streifung oder rötliche Beimischungen, die den Ton geradezu fleischfarben gestalteten. Die Hauptmasse aber war weiss mit einem leisen Stich ins Gelbliche oder Bläuliche. Wir haben eine Anzahl dieser verschiedenen Proben mitgenommen und nach Berlin geschickt... Dass der mitgenommene Marmor nicht identisch sei mit dem der Gigantomachie erkannten wir schon an Ort und Stelle daran, dass ihm der für jenen so bezeichnende bituminöse Geruch fehlt. Im übrigen aber sind beide sehr verwandt, sowohl im Korn wie im Ton. Die Architekturstücke vom Altar, welche ich auf der Burg mit Hans Schrader durchmusterte, schienen uns aus dem Marmor vom Ak-Kaya hergestellt, sie sind eben so blautstreifig wie die blauesten der mitgenommenen Stücke, und auch in einigen nicht vom Altar stammenden pergamenischen Skulpturen in Berlin glauben die Herren Freres und Possenti ihn wieder zu erkennen...". Und 11 Jahre später stellte WINNEFELD (1910, S. 112) fest: "Der Fries ist gearbeitet aus Blöcken grosskrystallinischen bläulichen Marmors..."; "Der Marmorbruch, in dem der Stein ge-

wonnen wurde, ist noch nicht nachgewiesen; die Möglichkeit, dass er am Fuße des Akaya im Kozak gelegen sei (Schuchhardt, Mitt.d.athen.Inst. XXIV (1899) S. 149f.), bedarf noch näherer Nachprüfung an Ort und Stelle." Demgegenüber wird in einer 2 Jahre älteren Beschreibung die Verwendung von Kozak-Marmoren postuliert: "Daneben enthält das Gebirge mehrere Marmorarten. Der gewöhnliche graublau, der auf der Burg von Pergamon zu Bauten, Basen und Inschriftensteinen so vielfach verwendet ist, steht gleich nördlich auf dem Wege in den Kosak an verschiedenen Stellen zutage. Für den wertvolleren weissen habe ich wenigstens eine Stelle gefunden, den Ak-Kaja ('Weissfels'), 1,5 Stunden südlich von Aschaga-Beikoi, unmittelbar am Ajasmat-Tschaï. ... Der Stein ist grosskrystallinisch und durchweg weisslich, zum Teil ist er bläulich gestreift oder hat rötliche Beimischungen. Der schwefelige Geruch, den der Gigantomachie-Marmor hat, fehlt ihm. Die Proben, die wir mitnahmen, ergaben bei der Vergleichung auf der Burg und in Berlin, dass anscheinend die Architekturstücke vom Altar und auch einige nicht vom Altar stammende Skulpturen aus dem Marmor vom Ak-Kaja hergestellt sein können. Alte Brüche haben wird an den Felsen nicht gefunden..." (SCHUCHHARDT 1912).

Ebenso wie Schuchhardt, der die Verwendung von Kozak-Marmoren in Pergamon postuliert, konnten auch Phillipson und Winnefeld keine antiken Abbauspuren erkennen. Allerdings erwähnt letzterer, dass sich oberhalb von Akkaya im Marmor eine Höhle (Stollen?) mit einer Inschrift befinden solle.

RYBACH & NISSEN (1965) halten Akkaya ebenfalls für eine mögliche Bezugsquelle.

7.7.4 Kozak-Marmore in Pergamon?

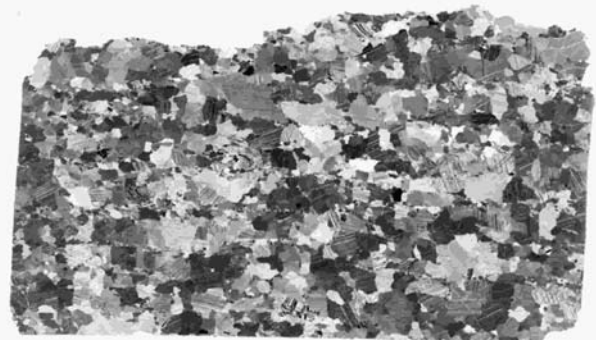


Abbildung 309: Grobkörnigerer Akkaya-Marmor mit homogenerem Korngefüge als prokonnesische Marmore (Ak3), N+, Maßstabsbalken 2 mm

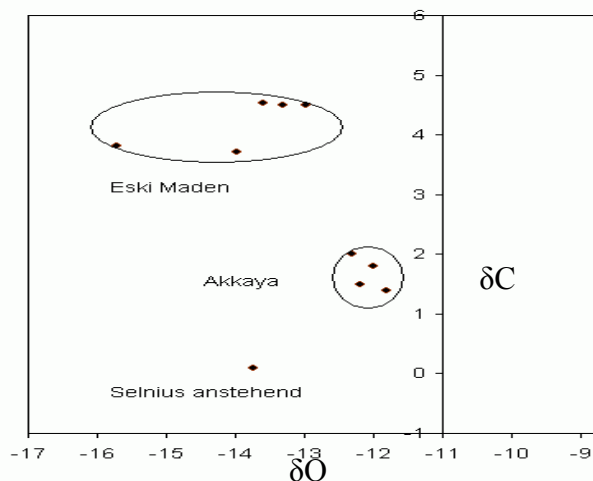


Abbildung 310: C/O-Isotopie der Marmore vom Kozak. Alle Werte liegen außerhalb des Bereiches der meisten in der Antike verwendeten Marmore

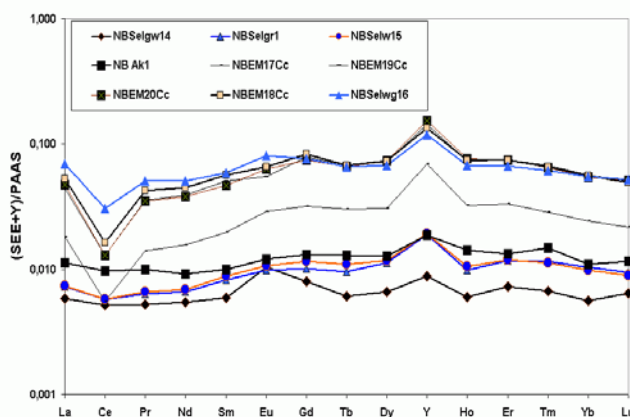


Abbildung 311: SEE-Verteilungsmuster der Marmore vom Kozak. Anders als die feinkörnigen Marmore von Eski Maden weisen die Akkaya-Marmore keine negative Cer-Anomalie und niedrige Y-Gehalte auf

	Akkaya Mittel-grobkörnig			Eski Maden Feinkörnig		
	Mittelw.	Min.	Max.	Mittelw.	Min.	Max.
Quarz XRD	,31	,23	,39	,29	,24	,40
Dolomit XRD	1,63	,76	2,51	,13	,00	,36
ΣSEE	1,37	1,03	1,89	6,02	2,47	8,86
ΣSEE/Y	3,25	2,47	4,30	1,79	1,32	2,76
Y/Ho (mol)	82	67	98	97	89	108
Ce _{neg}	,88	,82	,93	,37	,31	,51
Sr-ICP-Ms	442	342	695	400	312	620
Fe (OES)	230	102	358	248	113	384
Fe	203	102	265	266	115	565
Fe FI-AAS	272	265	285	218	89	448
Mg Gew%	,23	,16	,29	,42	,36	,48
Mg ICP-AES ppm	3631	2075	5522	3256	2461	5490
Mn (OES)	29	19	39	69	27	111
Mn FI-AAS	31	28	34	47	12	102
Fe/Sr	,59	,28	1,03	,61	,30	1,04
δO		-13,74	-11,81		-15,71	-12,99
δC		0,10	2,00		3,72	4,53

Tabelle 34: Merkmale von Kozak-Marmoren

Obwohl die Marmore aus den untersuchten kontaktmetamorphen Marmorlinsen des Kozak teilweise vorindustrielle Abbauspuren aufweisen, kann ihre Verwendung im antiken Pergamon nicht nachgewiesen werden. Sowohl Marmore von Akkaya – von dem Ende des 19. Jahrhunderts als vermuteter Werkstein (SCHUCHHARDT 1899) des Pergamonaltars Proben⁷⁴ nach Berlin gebracht wurden – als auch unser in Eski Maden und am Selinus gesammeltes Material unterscheiden sich zu deutlich von sämtlichen untersuchten antiken Objekten. Erstere sind weiß und etwas grobkörniger (Abbildung 309) als die prokonnesischen Marmore, das Korngefüge ist homogener bei nur geringen Anzeichen postkristalliner Deformation, allerdings mit Anzeichen von Kornorientierung und Schichtung, und wie schon SCHUCHHARDT (1912) aufgefallen ist, strömen sie beim Zermahlen keinen Geruch aus. Bei einer δC-Spannweite von 1-2 zeichnen sie sich durch eine stark negative Sauerstoffisotopie zwischen -12 und -16 aus (Abbildung 310).

Anders als bei Akkaya weisen die Eski Maden Marmore ein ähnliches SEE-Verteilungsmuster wie die vom Pergamonaltar auf (Abbildung 311) – einschließlich negativer Cer-Anomalie und ΣSEE/Y-Verhältnissen unter 2. Aber sämtliche δC-Werte liegen um 4,5 (Abbildung 310), Sr zwischen 3-400 ppm und auch die sonstigen Spurenelementgehalte sind meist höher. Insbesondere ist ihr Gefüge wesentlich feinkörniger. Zwar sind bei Eski Maden sowohl moderner Abbau (wohl für Kalkbrennereien) als auch Spuren vorindustriellen Abbaus vorhanden. Aber insgesamt liegen die Marmorlinsen in während der Antike noch weitaus unwegsamem Gelände und weisen zu geringe Kluftabstände und damit zu kleine potentielle Blockgrößen auf (Abbildung 307 + Abbildung 308).

Allerdings erfolgte nur eine zahlenmäßig geringe Beprobung von Architekturteilen des Pergamonaltars, die sich fast vollständig auf der Akropolis befinden. Zukünftige Beprobungsmöglichkeiten dort und der Vergleich mit einem erweiterten Akkaya-Datensatz könnten endgültige Aussagen erlauben.

⁷⁴ Im Charlottenburger Museum aufgefundene Fragmente sind bereits 1995 zusammen mit den Telephosfriesmarmoren untersucht worden, s. CRAMER (1998)

7.7.5 Marmorverwendung in Pergamon

Da lokale Marmore offensichtlich nicht verwendet wurden, mussten die Marmore sämtlich importiert werden, wofür der an der Küste gelegene Hafen von Elia und die Möglichkeit des Schifftransportes über den Kaikosfluss beste Voraussetzungen schufen. Zu Beginn wurde der Marmor noch sparsam eingesetzt, für Leisten und Wandfliesen als Zierelemente im andesitischen Gestein (Abbildung 312), mit zunehmendem Wohlstand und unter Einfluss hellenistischen und römischen Verständnisses verstärkt auch als Baumaterial für ganze Gebäude und Tempelanlagen.



Abbildung 312: Marmorleiste in Andesitmauer

Dass seit römischer Zeit sehr viel prokonnesischer Marmor verwendet wurde, ist unbestritten und insbesondere für das Trajaneum hinreichend dokumentiert. Ein anschauliches Beispiel liefert auch die im Stadtgebiet gelegene Rote Halle, für deren Eingang ein Block von über 7 m Länge verwendet wurde (s. Abbildung 97). Aber seine von uns festgestellte breite Verwendung bereits seit den frühen Attalidenherrschern ist doch etwas überraschend. Zudem scheinen frühere Hinweise in dieser Richtung wieder in Vergessenheit geraten zu sein. So stellte CONZE (1913, S.153) fest: *"Bei steigendem Reichtum erst, nicht vor der Königszeit, begann die Zufuhr auswärtigen Baumaterials... Neben der Benutzung des blauen Marmors, den schon die umliegenden Gebirge bieten, begann in der Königszeit die Einfuhr weißen Marmors, der in der Nähe nur spärlich vorkommt, vermutlich besonders vom Marmarameere her, und der Berg überzog sich an einzelnen Stellen mit der schimmernden Pracht dieses Materials in Bauten und Bildwerken."* Ob er mit dem „blauen Marmor“ den von Lesbos Moria, stärker gebänderte Marmore von Prokonnesos, die häufig als bläulich beschrieben werden, oder sonstige

Quellen gemeint hat, ist unklar. Aber die Erwähnung des Marmarameeres als Bezugsquelle bereits zur Königszeit bleibt bemerkenswert. Bei HERRMANN & BARBIN (1993) finden sich folgende Hinweise: "At Pergamon much of the greyish medium- to large-grained marble used for architectural purposes appears to have come from the Proconnesos..." Anm. 12: "e.g., Traianeum and Kizil Avle; the marble in the Asklepieion and the temple of Dionysos also seemed to be Proconnesian..." Anm. 17: "The marble of the Great Altar seemed to be Proconnesian."

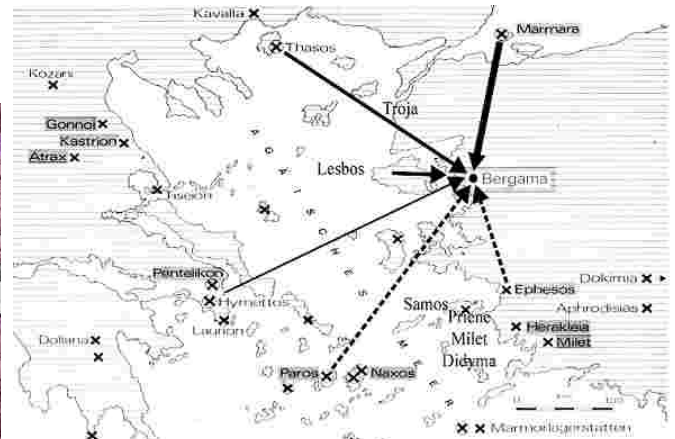


Abbildung 313: Herkunftsgebiete von in Pergamon verwendeten Marmoren: Marmara, Thasos, Lesbos, Hymettos; Paros-Lychnites kann unterdessen zugunsten von Ephesos ausgeschlossen werden, Naxos ist fraglich

Wie anschließend detailliert gezeigt wird, konnten in Pergamon bisher fünf Marmorliefergebiete nachgewiesen werden (Abbildung 313): hauptsächlich für den Pergamonaltar und spätere Großbauten wie das römische Trajaneum hellerer prokonnesischer Marmor (von Marmara) mit schwach bis deutlich ausgeprägter Bänderung, von Lesbos dunkle Marmore – oft mit helleren fossilen Megalodonten-Resten –, Thasos-Aliki lieferte grobkörnigen Marmor, sehr feinkörniger hymettischer Marmor findet sich im Relief des Marmorsaals. Ob – wie in Abbildung 313 angedeutet – auch Marmore von Paros und Naxos eingeführt wurden, bedarf zukünftiger Klärung. Hingegen kann an der Verwendung ephesischer Marmore, die einige Ähnlichkeit mit Paros-Lychnites aufweisen, zumindest für Teile des Dionysostempel unterdessen kein Zweifel mehr bestehen.

In Tabelle 35 sind wesentliche Merkmale der untersuchten antiken Artefakte und der ihnen zugeordneten Steinbrüche zusammenfassend dargestellt. Sie werden in den einzelnen Kapiteln detaillierter erläutert.

Probe (Museum / STEINBRUCH)	N	MGS mm	Gefüge	Dol Gew%	Ger.	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	ΣSEE ppm	$\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$	Cer_{neg}	Sr ppm	Fe ppm	Fe/Sr	Mg Gew%	Mn ppm
Pergamon Altar (Großer Fries)	62	2.3-3.1	Het/za	0-0.1	+++	2.5/2.9	-0.2/-5.3 -10.3	0.6-4.1	0.7-1.2	0.2-0.5	166-266	10-40	0.05-0.25	0.27-0.42	5.1-10.4
Telephos Fries (1995 und 2001)	29	2.5-3.6	Het/za	0-1.6	+++	2.4/3.5	-0.3/-5.0 -7.4/-11.7	0.7-6.1	0.8-1.4	0.1-0.5	141-229	23-80	0.13-0.43	0.2-0.69	4.2-10.6
Demeter Tempel (Fries)	3	2.5	Het/za	-	+++	2.7/2.9	-0.9/-1.4	2.2-2.3	1.168-1.319	0.33-0.36	127-138	17.4	0.13	0.3	8
Hellenist. Tempel Oberer Markt	3	2	Het/za	0	+++	2.6/3.0	-0.8/-1.6	1.694	1.113	0.3	176	18.2	0.11	0.31	5.2
MARMARA (v.a. Doğu Camlik)	21	2-3.5	Het/za	0-4	+++	0.6/3.5	-0.5/-3.4 -8.5/-13	0.046-5.222	0.32-1.46	0.2-0.5	113-275	8-91	0.1-0.3 (1x0.68)	0.21-1.1	2.5-10.1
AKKAYA (N-Bergama)	6	2-3.5	Het-hom	0-2.5	-	0.1/2	-11.8/-13.7	1-1.9	2.5-4.3	0.8-0.9	342-695	102-284	0.28-1.03	0.16-0.55	18.7-38.7
Marmorsaal Waffenrelief	3	0.4	Hom	0	++	1.4/1.7	-2.48/-2.88	6.2	1.8	0.35	109	226	2.04	0.23	7.7
HYMETTOS	2	0.2-0.5	Hom	0	++	1.9/2.5	-2.4/-5.7	3-3.3	1	0.2	94-149	25-26	0.42	0.17-0.24	5-7.3
Tempel R bei Oberem Gymnasion	2	4	Hom-het/ger	0.1	++	3.02/3.10s	+0.02/+0.17	2.7	1.3	0.15	113	26	0.23	0.4	18
THASOS-ALIKI	2	3-4	Hom-het/ger	0	++	3.1	-1.93	4.0-5.6	1.3	0.17-0.18	90-109	70-85	0.64-0.95	0.26-0.37	16-80
Dionysos Tempel (hellenistisch)	4	2	Hom/ger	0.1-2.6	-	4.42/4.62	-6.09/-6.14	11.4.	2.654	0.54	114	246	2,16	1.13	23.6
EPHESOS AYTEKIN	2	2	Hom/ger	0-20	-	2.8/4.32	-5.39/-8.23	9-12.4	1.41-2.27	0.26-0.52	95.5-186	22.2-946	0.23-5.07	0.14-4.21	3.01-192

Tabelle 35: Petrographische und geochemische Merkmale antiker Marmorartefakte aus Pergamon und ihnen zugeordneten STEINBRÜCHEN. N: Anzahl der Messproben, MGS: maximum grain size; het/hom: heterogenes oder homogenes Gefüge; za/ger: gezahnte/gerade Korngrenzen; Dol: Dolomit (XRD); Od: Geruch, $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$: stabile Isotopen in Promille auf PDB-Standard; $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$: Summe der SEE zu Y; Cer_{neg} : negative Cer-Anomalie bez. auf PAAS (1 sehr schwach, 0.2 sehr ausgeprägt)

7.7.6 Phänotypische Zuordnung von Gesteinsartefakten auf der Akropolis von Pergamon

Isotopendiagramme und eine erste Interpretation der für Pergamon relevanten Marmore wurden bereits in Kapitel 7.2 vorgestellt. Die meist anhand des Befunds kleinerer Museumsproben getroffenen Zuordnungen zu Marmorlagerstätten auf multivariater Basis (Tabelle 35) wurden bei einer weiteren Fahrt nach Pergamon⁷⁵ im September 2003 auf der Akropolis überprüft und teilweise erweitert. Dabei kamen das große Interesse der unter Leitung von Wolfgang Radt tätigen ArchäologInnen an der Klärung der Provenienzfragen der verwendeten Natursteine sehr zustatten. Aus Zeitgründen konnten nur an zwei halben Tagen genauere Inspektionen vorgenommen werden. Es wäre aber unterdessen ohne weiteres möglich, mit dem jetzigen Kenntnisstand binnen weniger Tage fast sämtliche relevanten Gesteine dort zu charakterisieren und zu katalogisieren. So zeigt sich neben der allgemeinen Verwendung anstehenden vulkanischen Gesteins exemplarisch auf dem Gelände der Bibliothek und des Athenaheiligtums

(Abbildung 314) die Verwendung granodioritischer Materials (aus dem Kozak, s. Abbildung 306) an liegendebliebenen Säulen, einmal mit und einmal ohne größere Feldspatkristalle, sowie einer Vielzahl verschiedener Marmore (s. Diskussion Waffenrelief Kapitel 7.7.12). Das um 235 v.u.Z. unter Attalos I geschaffene Rundmonument (POCHMARSKI 1999) besteht aus Marmoren von Lesbos-Moria (Abbildung 317), ebenso wie mehrere Platten entlang der einreihigen Säulenreihe.



Abbildung 314: Blick auf Athenaheiligtum mit doppelter Säulenreihe vorne und Rundmonument Bildmitte links

⁷⁵ Im Anschluß an die ASMOSIA-Konferenz auf Thasos dank Fährverbindung, die im März 2000 nicht bestand, von Mytilene (Lesbos) über Ayvalik nach Pergamon.

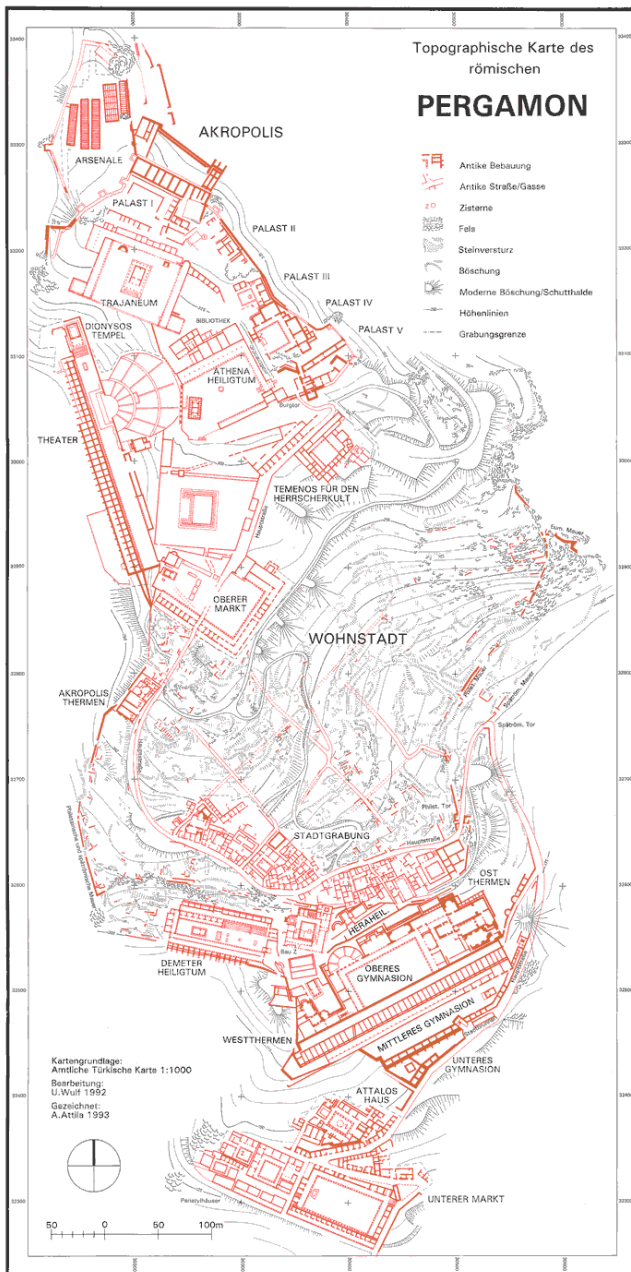


Abbildung 315: Übersichtsplan der wichtigsten Ausgrabungen in Pergamon (aus RADT 1999)



Abbildung 316: Detail des Athenaheiligtums mit streifigen Marmoren



Abbildung 317: Rundmonument am Athenatempel aus dunklem Marmor mit hellen Megalodonten von Lesbos Moria

An der einreihigen und der inneren der doppelten Säulenreihe des Athenaheiligtums (KÄSTNER 1996) lassen sich folgende Gesteine feststellen (in Klammer Säulennummern, i: innere Säulenreihe):

- a) parallel zur Längsachse gebänderte Marmore mit bis 3 mm großen Kristallen in einer feinkörnigeren Matrix, also ein heterogenes Korngefüge; parallel der Bänderung ist es zu starker Rissbildung gekommen, möglicherweise durch Glimmerlagen verursacht (1, 5, 8, 3i, 6i, 9i)
- b) wie a), aber ohne Risse (2, 4, 9, 1i, 2i, 4i, 5i, 8i, 13i)
- c) sehr grobkörniger Marmor mit Kristallen bis 15 mm und darüber in einem heterogenem Korngefüge, ohne Bänderung aber mit helleren Schlieren anders orientierter und gewachsener Calcitkristalle (3)
- d) mit Flechten usw. überwachsene gelbliche Gesteine, möglicherweise Vulkanite (6, 7)
- e) ähnelt b), aber quer zur Bänderung bearbeitet und gefleckt (7i)
- f) ähnelt auf erstem Blick e), aber mit Korngrößen bis 4 mm und homogenerem Korngefüge sowie dunkler erscheinend (13).

Bei a), b) und e) handelt es sich dem äußeren Befund nach um prokonnesische Marmore; bei c) möglicherweise um Marmor von Naxos; bei f) könnte es sich um Marmore aus Ephesos handeln.

Aus Zeitgründen konnte die äußere der zweireihigen Säulenreihen nicht genauer erfasst werden, aber hier zeigt schon eine flüchtige Inaugennahme das Vorhandensein weiterer eher dunklerer und inhomogener Marmorvarianten an.

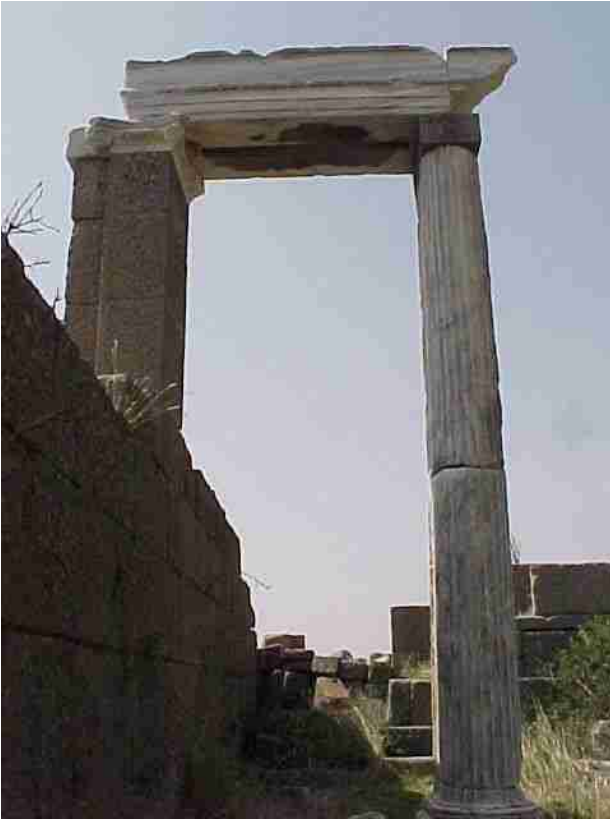


Abbildung 318: In andesitische Außenwand integrierte streifiger Marmorträger und Säule

Am Oberen Gymnasion stammt der Grundbau aus dem 2. Jh. v.u.Z., die aufgestellte Säulenreihe aus dem 2. Jh. u.Z. Auch hier dominiert Andesit, zwei um das Mittelpodest gruppierte Säulen bestehen offensichtlich aus gelblichem Trachyt. Am Ostrand befinden sich mehrere dunkle Bodenplatten vom Lesbos-Moria-Typ sowie hellgraue Marmorsäulen mit helleren Fossilrändern und größerem Korn, möglicherweise ebenfalls aus Moria. Einige, aber keineswegs alle gestreiften Marmore können eindeutig Prokonnesos zugeordnet werden. Die meisten Säulen zeigen ein homogenes Korngefüge mit Kristallgrößen um 2 mm; auffällig ist das Vorhandensein von i.d.R. feinkörnigem Dolomit, entweder als Butzen oder als dünne Bänder, oft mit positivem Verwitterungsrelief. Manche Dolomitbänder sind aber auch handbreit und durchziehen die Säulen von oben nach unten. Andere zeigen zusätzlich daumenfingerlange grauschwarze Tupfer. Hier scheinen vor allem Marmore aus Ephesos (und nicht aus der Bafa-See-Region, deren Dolomite häufig deutlichere reliktsche Strukturen aufweisen) Verwendung gefunden zu haben, wofür sowohl die Ähnlichkeit mit den Proben des Dionysostempels als auch die Tatsache spricht, dass Ephesos längere

Zeit zum Pergamenischen Königreich gehörte. Selbst im Bereich des Großen Altars finden sich neben prokonnesischen und lesbianischen Marmoren gleichkörnige helle Marmore ohne Bänderung.

An mehreren Stellen, so auch zwischen Athenaheiligtum und Großem Altar, finden sich Platten aus sehr feinkörnigem Marmor, der äußerlich der Probe entspricht, die vom Relief im Marmorsaal stammt und aufgrund mehrerer Merkmale als hymettisch identifiziert wurde.

Auch im Bereich des Demetertempels, der vorwiegend aus Andesit besteht, sind neben Marmoren aus Prokonnesos ein homogenmittelkörniger Marmor, ein sehr feinkörniger, dolomithaltiger Säulenschaft mit Inschrift sowie dunkle megalodontenführende Moria-Marmore zu finden.

Im Bereich des umgebauten dorischen Tempels am Gymnasion kommen gehäuft grobkörnigere Marmore vom Thasos-Aliki-Typ vor. Bruchstücke dieses Typs befinden sich aber auch an vielen anderen Stellen. Entweder handelt es sich um verschleppte Fragmente des gleichen Bauwerks, also besagten Tempels, oder Thasos-Aliki-Marmore fanden noch an anderer Stelle Verwendung, so am Oberen Markt oder gar am Dionysostempel. Im ersten Fall müssten sie dann aber hangaufwärts verschleppt worden sein.

Eine genauere geowissenschaftlich begründete Kartierung der vorhandenen Marmorfragmente könnte dazu beitragen, solche Bruchstücke entweder zusammenzufügen oder unterschiedlichen Entwicklungsstufen bestimmter Anlagen zuzuordnen. Im Bereich des Dionysostempels konnten neben prokonnesischen Marmoren auch mittelkörnig-homöoblastische (wahrscheinlich aus Ephesos), grobkörnige (von Thasos-Aliki) und dunkle Marmore (möglicherweise von Lesbos-Moria) gefunden werden, zusätzlich noch zwei Säulen aus „Buntmarmoren“.

Die höhergelegenen Bereiche ab dem Trajanum konnten aus Zeitgründen nicht mehr untersucht werden, bieten aber sicherlich noch aufschlussreiche Erkenntnisse.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Vorherrschender Werkstein in Pergamon ist anstehender Andesit, untergeordnet auch Tuffe sowie Kozak-Granodiorite.
- Für die Verwendung lokalen Marmors aus dem Kozak konnte kein Beleg gefunden werden. Aber erst die Beprobung weiterer zumindest repräsentativer Architekturteile auf der Akropolis würde erlauben, die Kozak-Marmore endgültig auszuschließen.
- Mengenmäßig dominieren unter den folglich eingeführten Marmoren prokonnesische von Marmara, gefolgt von solchen aus Ephesos sowie Lesbos Moria.
- Da auf Lesbos auch hellere Marmore vorkommen und nicht alle dunklen Marmore Megalodonten-Spuren aufweisen, und weil sich dort Hinweise für eine engere Verbindung mit Pergamon finden, ist eine genauere Untersuchung der dortigen Marmorlagerstätten geboten. Vergleichende Beprobungen auf der Akropolis würden zudem definitive Aussagen bezüglich der Kozak-Marmore erlauben.
- Untergeordnet finden sich grobkörnige Marmore von Thasos-Aliki sowie sehr feinkörnige Marmore vom Hymettos.
- Möglicherweise fand auch sehr grobkörnig-heteroblastischer Marmor von Naxos Verwendung.
- Einige Marmore auf der Akropolis lassen sich bisher nicht eindeutig zuordnen. Eine genauere Katalogisierung nach dem Ausschlussprinzip würde die Feststellung erlauben, wo noch gezielt Probenmaterial zu entnehmen ist, um eine möglichst vollständige Dokumentation der in Pergamon verwendeten Marmore zu erstellen.

7.7.7 Pergamonaltar - Großer Fries (ZO Prokonnesos)



Abbildung 319: Fundamente des Zeusaltars nach Ausgrabung (KUNZE 1992) und heute



Abbildung 320: Nordfries des Pergamonaltars während der Restaurierung

Der Pergamonaltar wurde unter Eumenes II um 170 v.u.Z. auf einem Fundament aus rostförmig angeordnetem Andesit errichtet (s. Abbildung 319 oben), dessen Zwischenräume zur Dämpfung von Erdbebenwellen mit weichem Tuff ausgefüllt waren. Der Sockel sowie die heute in Berlin aufgestellten Platten vom Großen Fries (Abbildung 3 auf S. 14) und des Telephosfrieses bestehen hingegen aus Marmor, dessen weitgehend prokonnesische Herkunft nun als geklärt

angesehen werden kann. Seine wichtigsten an 80 Proben festgestellten Eigenschaften wurden bereits im Kapitel über Marmara dargestellt, in Tabelle 25 und Tabelle 35 zusammengefasst und anderswo ausführlich beschrieben (CRAMER *et al.* 1996a, b; CRAMER 1998; CRAMER *et al.* 1998; CRAMER *et al.* 2001, 2002; CRAMER *et al.* 2003, in press; GERMANN & CRAMER in press). Weitere Details finden sich im Abschnitt über den Telephosfries.

Auch von D. Attanasio und Y. Maniatis durchgeführte ESR-basierte Charakterisierungen (Kapitel 3.2.4 und 4.11) sowie Aufnahmen der Kathodolumineszenzmikrofazies durch K. Ramseyer und D. Decrouez (Bildtafel Kapitel 4.11.1) an Proben des Großen Frieses und des Telephosfrieses bestätigten dieses Ergebnis.

Dass die prokonnesische Herkunft des Pergamonaltars nicht bereits früher erkannt wurde, mag auch daran liegen, dass typische äußere Merkmale, wie seine dunklere parallele Bänderung durch Bearbeitung der Reliefoberflächen parallel zu dieser wohl als störend empfundenen farblichen Inhomogenität nicht zur Geltung kommen. Sie treten an den gereinigten Platten des Großen Frieses⁷⁶ jedoch deutlicher zu Tage. Wahrscheinlich sind mit der folgenden Beschreibung prokonnesische Marmore und nicht solche von Lesbos gemeint: "Dessen (des Sockelbaus, Anm. T.C.) Außenhaut bestand, wie das gesamte sichtbare Gebäude, aus einem grau geäderten Marmor, der für viele pergamenische Bauwerke und Skulpturen typisch ist" (RADT 1999, S. 171).

Tatsache ist, dass sich im Sockelbau des Pergamonaltars und unter den ihn umgebenden Wandquadern der Außenwand des Altarhofs äußerlich erkennbare grau gebänderte prokonnesische Marmore befinden, aber auch dunklere Marmore, wie sie in den Brüchen von Lesbos-Moria anzutreffen sind. Letztere sind teilweise homogen dunkelgrau, teilweise mit helleren Lagen (vgl. Abb. 21 in HEILMEYER *et al.* 2004) und auch fossilen Einschlüssen (Megalodonten) versehen, selten auch heller mit dunklerer unregelmäßiger Streifung.

7.7.8 Pergamonaltar - Telephosfries (ZO Prokonnesos)

Die Restaurierung des Telephosfrieses (s. Kapitel 4.2.1) bildete den Auftakt der noch immer nicht abgeschlossenen Restaurierungskampagne an Marmorobjekten der Berliner Antikensammlung (DREYFUS & SCHRAUDOLPH 1996; HEILMEYER 1997). Seine Merkmale sind bereits früher ausführlich untersucht worden (CRAMER *et al.* 1996b; CRAMER 1998). Die Vermutung einer prokonnesischen Herkunft seiner Marmore konnte inzwischen bestätigt werden.



Abbildung 321: Eine der wenigen Platten(48) des Telephosfrieses mit in der Draufsicht sichtbarer Bänderung des Marmors

Nur selten waren die Reliefplatten derart bearbeitet, dass die charakteristische parallele Bänderung so deutlich sichtbar wird wie in obiger Abbildung 321.

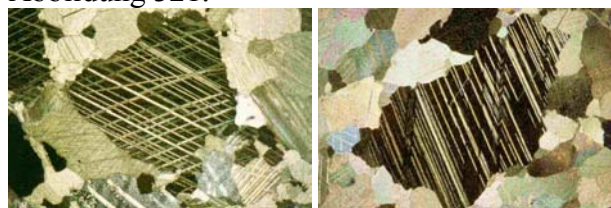


Abbildung 322: Dünnschliffe von Marmor des Telephosfrieses TF8 (l) und von Marmara Silinte (r), kurze Kante 2,4 mm

Das typische heteroblastische Korngefüge mit starken Deformationserscheinungen prokonnesischer Marmore tritt in allen Dünnschliffaufnahmen deutliche zu Tage (Abbildung 322 - Abbildung 324).

⁷⁶ Die Restaurierungsarbeiten am Pergamonaltar wurden mit der feierlichen Übergabe am 10. Juni 2004 offiziell für abgeschlossen erklärt.

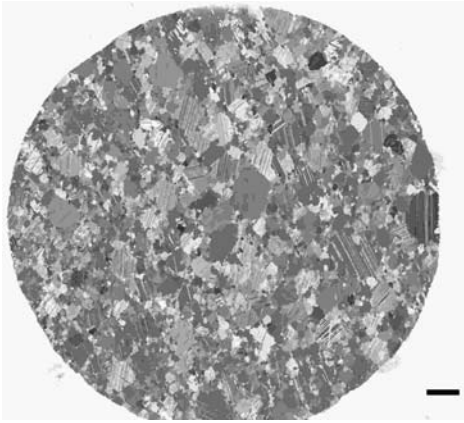


Abbildung 323: Etwas grobkörniger Marmor (B1 von Platte 1) mit $\delta O -11,7$, N+, Maßstabsbalken 2 mm

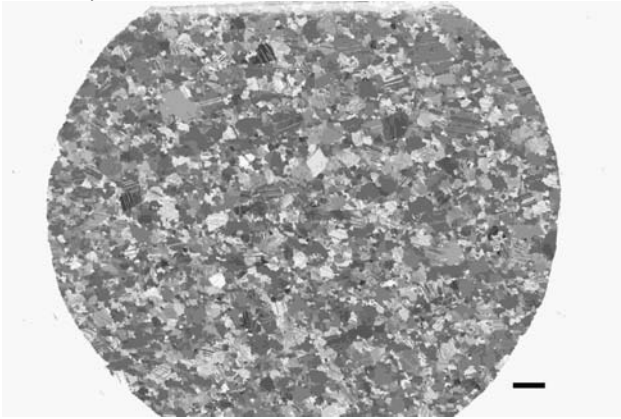


Abbildung 324: Etwas feinkörniger Marmor (Platte 16) mit "normalem" δO von $-0,9$, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Beim Vergleich der Gesamtdünnschliffaufnahmen wird etwas deutlicher als unter dem Mikroskop erkennbar, dass die Marmore mit einer stark negativen Sauerstoffisotopie tendenziell ein etwas größeres Korn aufweisen. Eine generelle positive Korrelation zwischen Korngröße und Verarmung der schweren Sauerstoffisotopen ließ sich allerdings nicht nachweisen.

Wie schon gezeigt, stimmen die geochemischen Messergebnisse der Telephosfriesmarmore mit den 1996 erhaltenen sehr gut überein.

Bemerkenswerterweise streuen vor allem die geochemischen Merkmale des Telephosfrieses breiter als die des – aus wesentlich mehr Platten und verwendetem Marmor bestehenden und auch in größerer Anzahl beprobten – Großen Frieses. Für Letzteren wurde demnach eine homogenere Marmorcharge verwendet, während der Telephosfries sowohl in der Qualität der Ausarbeitung als auch des Materials weniger erlesen erscheint. In jeden Fall decken sich aber sämtliche Merkmale beider antiken Friesen vollständig mit denen prokonnesischer Marmore (vgl. Tabelle 25 und Tabelle 35).

7.7.8.1 Moderne Ergänzungen

Im Laufe der Restaurierungsgeschichte des Pergamonaltars kamen verschiedene Materialien zum Einsatz. Teilweise wurden für Ergänzungen prokonnesische Marmore wiederverwertet, die einzelnen Objekten nicht mehr eindeutig zugeordnet werden konnten. Im Rahmen der im Sommer 2004 abgeschlossenen Restaurierungskampagne wurde bewusst friaulischer Kalkstein eingesetzt (wahrscheinlich auch in Abbildung 325), um dem Betrachter den Unterschied zwischen Original und moderner Ergänzung vor Augen zu führen.

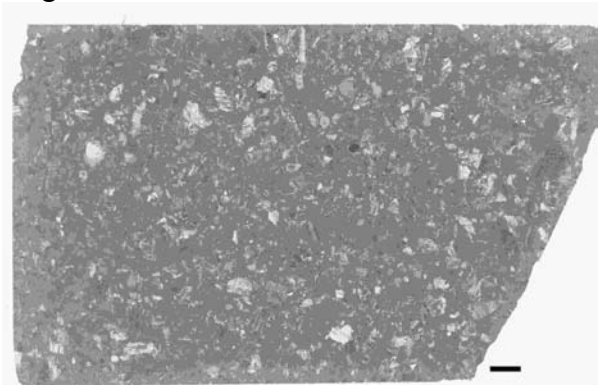


Abbildung 325: Moderne Ergänzung aus Kalkstein; GF 117_K1, N+, Maßstabsbalken 2 mm

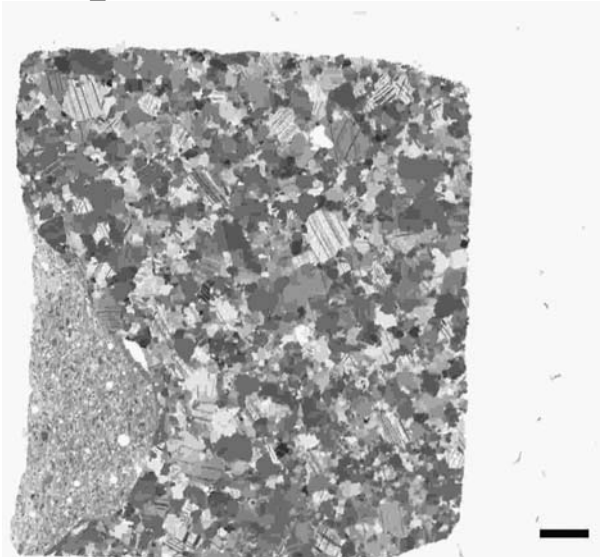


Abbildung 326: Zementergänzung an Platte 39, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Nicht solchen modernen museologischen Überlegungen folgend, sondern wohl mehr aus der Not geboren und vielleicht der Faszination „haltbarer“ moderner Werkstoffe erliegend, kamen auch Zemente zum Einsatz (Abbildung 326, nach Untersuchungen von Prof. Riederer, Rathgen-Forschungslabor u.a. Sorell-Zemente). In anderen Fällen wurden wahrscheinlich ein-

heimische Marmore eingesetzt, die den prokonnesischen Marmoren äußerlich nahe kommen. Die Platte 111 wurde mit Marmor ergänzt, der aus Wunsiedel stammt (Abbildung 329). Trotz äußerer Ähnlichkeit ist er etwas grob- und gleichkörniger.

Die Platte 109 (Abbildung 327) aus prokonnesischem Marmor wurde wiederum mit feinkörnigem Marmor aus Carrara ergänzt (Abbildung 328).

7.7.8.1.1 GF109E (ZO Carrara)

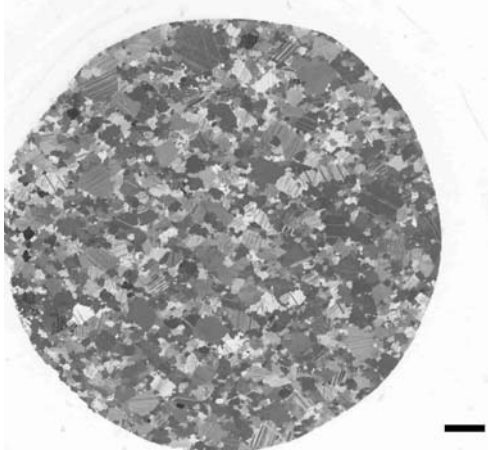


Abbildung 327: Prokonnesischer Marmor von Platte 109, N+, Maßstabsbalken 2 mm

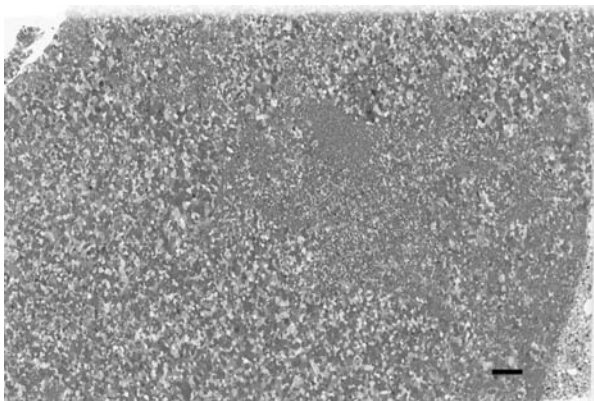


Abbildung 328: Moderne Ergänzung aus Carrara-Marmor an Platte 109E, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Während der größte Teil der Platte 109 aus prokonnesischem Marmor besteht, findet sich auch eine Ergänzung aus feinkörnigem weißem Marmor mit vollkommen anderen Merkmalen. Als Quelle kämen insbesondere hymettischer, pentelischer oder Carrara-Marmor in Frage (vgl. Diskussion im Kapitel 7.7.14: Marmorsaal). Die Isotopie der Probe liegt im rechten Feld der Carrara-Marmore, berührt knapp das von Hymettos, aber ist weit vom Penteli-Feld entfernt. Insgesamt ähneln die Dünnschliffaufnahmen am meisten denen von Carrara-Marmoren. Das Auftre-

ten von Bereichen größerer (MGS 0,5 mm, AGS 0,2 mm) und kleinerer Körner im Dünnschliff ist bei pentelischen und hymettischen Marmoren seltener. Auch der hohe Gehalt an akzessorischen Mineralien, besonders Quarz, Glimmer und Dolomit (aus Mg 1,1 Gew%) ist charakteristisch für viele Carrara-Marmore. Ebenso decken sich der hohe Fe- (570 ppm) und Mn-Gehalt (75 ppm) sowie das Fe/Sr-Verhältnis von 5,6 mit Messproben von Carrara. Dafür fehlt der Probe wie auch den weißen Carrara-Marmoren insgesamt der Geruch nach faulen Eiern, der bei Hymettos sehr häufig auftritt. Schließlich spricht die heute dominierende Verwendung feinkörniger Marmore aus Carrara für diese Zuordnung der wahrscheinlich nicht bei der Aufstellung, sondern erst im Rahmen von Restaurierungsarbeiten vorgenommenen Ergänzung am Pergamonaltar.

7.7.8.1.2 GF111E (ZO Wunsiedel)



Abbildung 329: Moderne Ergänzung der Platte 111 (wahrscheinlich Wunsiedel-Marmor)

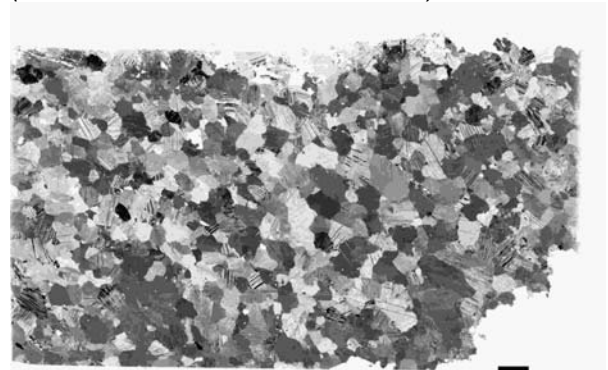


Abbildung 330: Wunsiedel-Marmor, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Eine weitere moderne Ergänzung am Pergamonaltar zeigt zwar auf den ersten Blick Ähnlichkeiten mit prokonnesischen Marmoren, unterscheidet sich jedoch bei genauerer Betrachtung deutlich. Statt dessen stimmen ihre Merkmale mit Probenmaterial von Wunsiedel (Bayern) vollständig überein (s. Kapitel 6.7). Das

mittelkörnige Gefüge und die teilweise geraden dunklen Bänderungen veranlassten möglicherweise die Verwendung dieses Marmors aus dem Fichtelgebirge. Eine Zuordnung alleine aufgrund der MGS und der Isotopie, die mit δC 2,32 und δO -3,35 im prokonnesischen Feld liegt, (ein heute immer noch weit verbreitetes Verfahren) hätte eindeutig Marmara als Bezugsquelle ergeben, zumal die Isotopie der beiden gemessenen Wunsiedelproben beträchtlich abweicht (δO -9,68/-6,76; δC 1,03/0,34) und die Annahme einer weiten Spannbreite in dieser Lagerstätte nahe legt (s. Kapitel 6.7). Doch das Korngefüge ist wesentlich homogener (MGS 2,6-3, AGS 0,9 mm) als bei prokonnesischen Marmoren, und schon das Nebeneinanderlegen von Probenmaterial aus Marmara, Wunsiedel und der Ergänzung zeigt die große Übereinstimmung zwischen den letzteren.

Aufschlussreich ist auch das Verteilungsmuster der SEE:

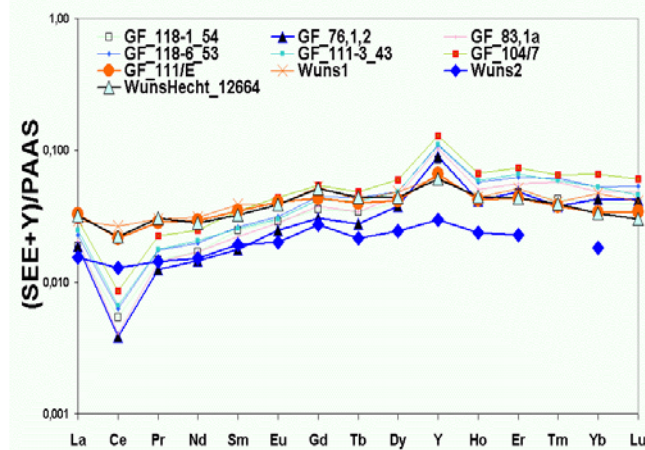


Abbildung 331: SEE-Verteilungsmuster von Marmoren aus Wunsiedel, der modernen Ergänzung GF111E und prokonnesischer Marmore des Pergamonaltars

Hier zeigt sich eine fast vollständige Übereinstimmung insbesondere mit der Probe Wuns1 und WunsHecht. Eine nur schwach ausgeprägte negative Cer-Anomalie sowie das hohe $\Sigma SEE/Y$ -Verhältnis von 2,9 (gegenüber maximal 1,2 bei den Großen-Fries-Proben, vgl. auch Abbildung 239) sind deutliche Unterscheidungsmerkmale zu den Proben prokonnesischer Marmore des Pergamonaltars, von denen aus Gründen der Übersichtlichkeit nur einige des Telephosfrieses exemplarisch dargestellt sind. Signifikant höher liegen auch die Gehalte an Mn (18,64/46,75/14,59//10,4 ppm) und Fe (545,7/583,3/172,1//41,1 ppm), sowie das Fe/Sr-

Verhältnis (3,00/3,54/0,98//0,25) (erster Wert jeweils Altarprobe, dann Wunsiedel, letzter Wert Maximum der prokonnesischen Proben vom Großen Fries). Trotz der Abweichung der Isotopie kann insgesamt eine Herkunft des Marmors der modernen Ergänzung von Wunsiedel angenommen werden; eine prokonnesische Quelle ist ohne Zweifel auszuschließen.

7.7.8.1.3 GF106E (ZO Prokonnesos)

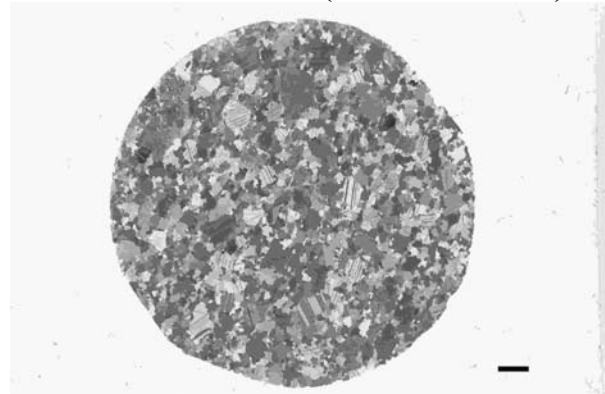


Abbildung 332: Moderne Ergänzung aus wiederverwertetem prokonnesischem Marmor (GF106E), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Bei einer weiteren modernen Ergänzung an der Platte 106 wurde offensichtlich prokonnesischer Marmor wiederverwendet. Da sich alle Merkmale vollständig mit diesen decken (s. Tabelle 25 und Tabelle 35), soll hier eine Dünnschliffaufnahme als Beleg ausreichen.

7.7.9 Demetertempel (Fries) (ZO Prokonnesos)



Abbildung 333: Demeterfries im Museum in Bergama (o.) und beprobtes Friesfragment der Berliner Antikensammlung (u.)

Der Demetertempel wurde unter Philetairos (281-263 v.u.Z.) aus lokalem Andesitgestein erbaut. Nur der Fries – das älteste erhaltene Beispiel eines Girlandenfrieses – bestand aus damals noch kostbaren und sparsam verwendeten Marmor. „Es ist auffallend, daß in die Trachytarchitektur ein Marmorfries eingefügt war, doch fand Dörpfeld diesen Wechsel im Material durch Verdübelung bestätigt.“ (BOHTZ 1981). Er gehört zu den frühesten Belegen der Verwendung prokonnesischen Marmors⁷⁷. Die auch in Abbildung 333 erkennbare – häufig als ins Bläuliche spielende beschriebene – dunkle Bänderung des weißgrauen Marmors mit größeren Kristallen (MGS 3 mm) in einer feinkörnigeren

⁷⁷ So schreibt RHEIDT (1996) ab S. 171: „Die wichtigste Neuerung für Pergamon ist zweifellos die Einführung des Baustoffes Marmor an prominentester Stelle des Bauwerks, eines Baustoffes, der am Ort selbst nicht zur Verfügung stand und deshalb besonders wertvoll war.“ Anm. 49: „Es ist auffällig, dass sowohl die Marmorwerkstücke des Demeter-Tempels als auch die des Zeustempels sehr kleine Formate haben. Es war in dieser Zeit vielleicht noch nicht möglich, großformatige Marmorteile mit entsprechenden Transportwagen auf den Burgberg zu schaffen.“

Matrix (Abbildung 334), der Geruch nach faulen Eiern beim Zermahlen, die Isotopie ($\delta\text{O} -1,24$, $\delta\text{C} 2,84$) sowie die Geochemie (neg. Cer-Anomalie, $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ von 1,168, Y/Ho von 107, 138 ppm Sr etc.) lassen widerspruchsfrei seine frühe prokonnesische Herkunft annehmen (s. Tabelle 25 und Tabelle 35).

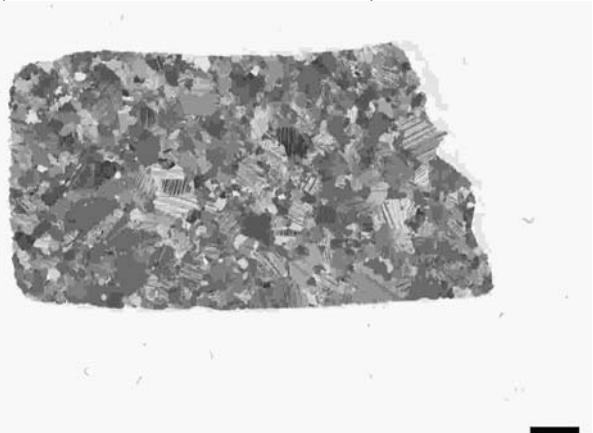


Abbildung 334: Friesfragment des Demetertempels aus Marmara-Marmor, N+, Maßstabsbalken 2 mm

7.7.10 Tempel Oberer Markt, Geison (hellenistisch) (ZO Prokonnesos)

Über die Datierung des Zeustempels am Oberen Markt schreibt RHEIDT (1996), es handle sich um „eines der ersten reinen Marmorbauwerke Pergamons“, das „sicher in der Zeit Attalos I., deutlich vor der Jahrhundertwende“ zu Beginn des letzten Viertels des 3.Jhs. errichtet worden sei. Wie schon beim noch älteren Demetertempel stimmen auch hier sämtliche Merkmale der untersuchten Geisonprobe widerspruchsfrei mit denen prokonnesischer Marmore überein (s. Tabelle 25 und Tabelle 35).

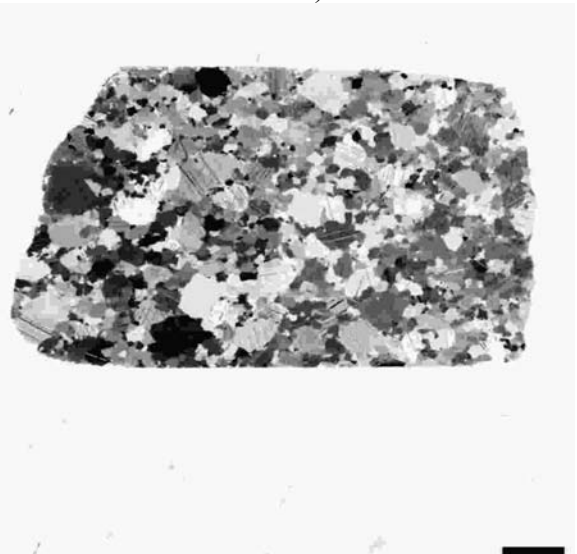


Abbildung 335: Prokonnesischer Marmor im Tempel am Oberen Markt, N+, Maßstabsbalken 2 mm

7.7.11 Kouros (ZO Prokonnesos?)

Von einem archaischen Kouros – Wende vom 6. zum 5. Jh. v.u.Z. (BLÜMEL 1963) – konnte lediglich für Isotopenanalysen ausreichendes Probenmaterial entnommen werden.



Abbildung 336: Kouros aus Pergamon im Archiv der Antikensammlung

Seine Isotopie ($\delta\text{O}/\delta\text{C}$ -2,86/2,82, -3,08/2,92) liegt im Marmara-Feld, überlappt dort aber auch mit zahlreichen anderen Lagerstätten. Da der kleine Kouros im Archiv der Antikensammlung recht stark überkrustet ist, fällt auch eine Zuordnung nach äußeren Merkmalen nicht eindeutig aus. In den wenigen erkennbaren Bereichen lassen sich zumindest Korngrößen und Korngütemerkmale (heterogenes Gefüge bei MGS um 3 mm) ausmachen, die eine prokonnesische Herkunft nicht ausschließen. Hierfür spricht auch eine Beschreibung zu einem Zeitpunkt, als die Kourosoberfläche noch besser erkannt werden konnte, ein "weißer, auffallend glanzkörniger Marmor mit großen Kristallen" (WINTER 1908). Trotz dieser Hinweise müsste weiteres Probenmaterial entnommen und untersucht werden, um für diesen dann frühesten Nachweis der Verwendung prokonnesischer Marmore in Pergamon eine abgesicherte Aussage treffen zu können.

7.7.12 Athenahallen, Waffenrelief (ZO Lesbos?)

Die Waffenreliefs der Athenahallen (s. Kapitel 7.7.6) von Pergamon entstanden ab 188 v.u.Z. unter Eumenes II (z.B. KNITTMAYER & HEILMEYER 1998a). Zum verwendeten Marmor wurde schon früh festgestellt: „...das Material derselben, ein blaugrauer, stark geaderter und sehr harter Marmor, zum Kalkbrennen nicht geeignet...“ (BOHN & DROYSEN 1885). Tatsächlich sind die Marmorfragmente bei sowohl heller als auch gräulicher Färbung von minderer Qualität. Aus Calcit ohne dolomitische Anteile bestehend, besitzen sie für helle Marmore ungewöhnlich hohe Anteile an opaken Akzessorien und Quarz, was auch bei den XRD-Peaks mit Gehalten zwischen 0,4 und 1,6 Gew% Quarz zum Ausdruck kommt. Zahlreiche Hellglimmer durchlaufen in parallelen Scharen das Calcitgefüge, das starke Anzeichen postmetamorpher Deformation wie bimodale Korngrößenverteilung bei MGS von 2,4 mm, Zerreibseln und oft gebogene breite und schmale Zwillingslamellen aufweist. Es sind durchaus Ähnlichkeiten mit Dünnschliffen prokonnesischer Marmore vorhanden, und einige ihrer Isotopenwerte aus der Originaldatenbank von HERZ (2003, pers. Mitteil.) decken sich. Jedoch abgesehen von dem ungewöhnlich hohen Gehalt an akzessorischen Mineralien einschließlich Glimmer ist der Anteil größerer Körner höher, und insbesondere sind die Korngrenzen noch wesentlich gezackter, unregelmäßiger und zugleich verschwommener. Auch aufgrund der geochemischen Daten scheiden prokonnesische Marmore aus.

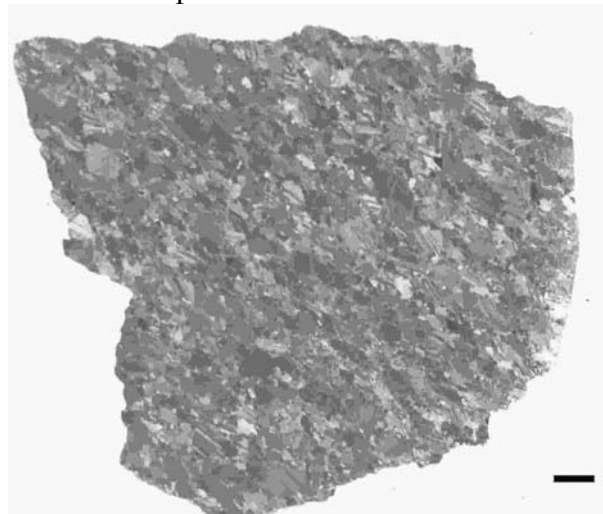


Abbildung 337: Marmor des Waffenreliefs der Athenahallen, N+, Maßstabsbalken 2 mm

7.7.13 Gebälk des hellenistischen Dionysostempel, Theaterterrasse (ZO Ephesos)

Der unter Eumenes II (197-159 v.u.Z.) errichtete Tempel des Dionysos bestand, abgesehen von dem andesitischen Unterbau, vollständig aus Marmor. Nach seiner weitgehenden Zerstörung wurde er während der römischen Kaiserzeit wiederaufgebaut, wobei die Beschreibung bei BOHN (1896) für die Verwendung prokonnesischen Marmors - wie auch beim Trajaneum - spricht: „Das Material (der Wandquader) ist weißer Marmor mit blauen Adern.“



Abbildung 339: Gebälkfries des Dionysostempels (oben) und des Altars (unten) in der Antikensammlung

Demgegenüber zeigen die der hellenistischen Bauphase zugeordneten Proben δO -Werte von -6,14 und mit prokonnesischen Marmoren nicht kompatibel auffällig hohe δC -Werte von +4,45. Unter Berücksichtigung der oft breiteren Sauerstoffisotopie-Spannweite korrespondiert der hohe δC -Wert sowohl mit Daten von parischen Lychnites als auch dem Ephesos-I-Feld (HERZ 1987), unseren Messwerten von Ephesos-Kursak sowie dem einer Probe von Ephesos Aytekin.

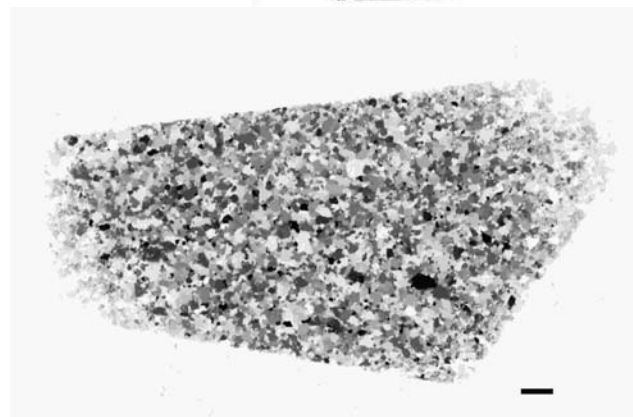
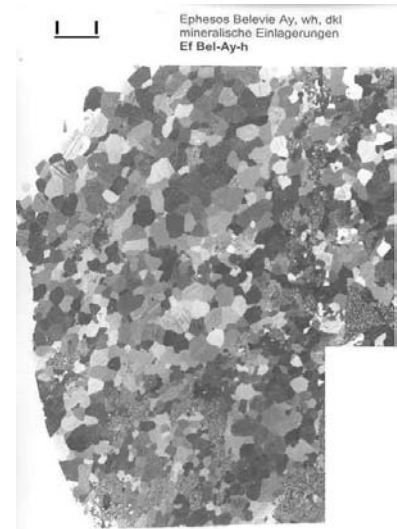
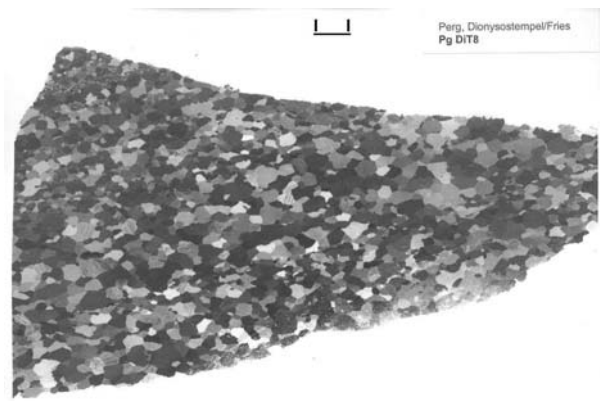


Abbildung 340: DS-Aufnahme von Fries des Dionysostempels (oben), darunter von Marmor aus Ephesos Aytekin. Unterste Abbildung parischer Lychnites (PaLyTUM38), N+, Maßstabsbalken 2 mm

Wegen der starken Verkrustung des Gebälkfrieses lassen sich seine äußeren Merkmale nur an wenigen Stellen erkennen.

Unter dem Mikroskop zeigen die reinweißen mittelkörnigen Marmorproben des Dionysostempels ein homogenes Gefüge. Besonders auffällig sind seine sehr geraden Korngrenzen. Dieses Merkmal ist relativ selten und gilt als ursächlich für die ausgezeichnete Transluzenz z.B. des Lychnites von Paros. Kursak-Marmore sind vergleichsweise grobkörniger (s.

Zugute kamen hierbei die umfassenderen Untersuchungen an Brüchen und Bauwerken in Ephesos (KOLLER *et al.* 2003; MUSS *et al.* 2003).

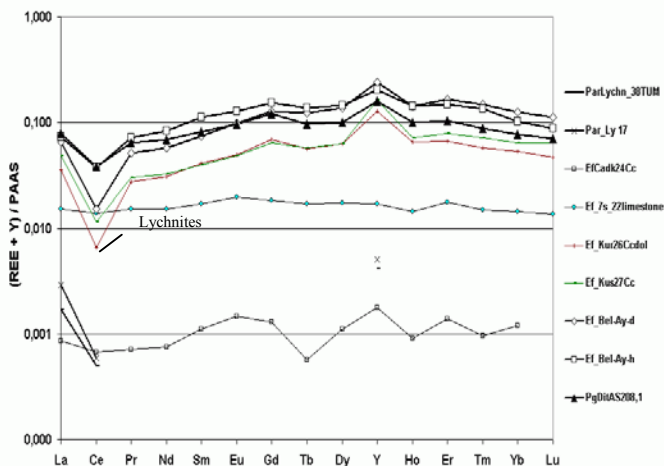


Abbildung 342: PAAS-normiertes SEE-Verteilungsmuster von Marmoren des Dionysostempels, aus Ephesos und parischen Lychnites

Gestützt wird diese, eine engere Verbindung von Pergamon und Ephesos implizierende Hypothese auch durch die Aussage von Bammer in seinem Aufsatz "Marbles at Ephesus and their relation to Paros": „The execution of certain architectural details makes it plausible that the Ephesian workshop was also active at the Artemision at Sardes and later at the altar of Pergamon, but as demonstrated, connections to Paros are only vague.“ (BAMMER 2000, S. 442). Und wie im Kapitel über die phänotypischen Merkmale der in Pergamon verwendeten Werksteine ausgeführt, legen äußerer Merkmale die Vermutung nahe, dass in Pergamon in sehr viel größerem Ausmaß ephesische Marmore verwendet wurden, als bisher angenommen.

7.7.14 Marmorsaal / Waffenrelief (ZO Hymettos)

Das Diodoreion des Marmorsaaes von Pergamon wurde im 2. Viertel des 1. Jh. v. u. Z. errichtet, das Relief nach dem Erdbeben von 17 u. Z. eingebaut. FILGIS & RADT (1986, S. 34) beschreiben die Waffenreliefs im Marmorsaal von Pergamon folgendermaßen: „Für die mit Reliefplatten geschmückte Wandverkleidung im Marmorsaal ist überwiegend dunkelgestreifter hellgrauer, gelegentlich auch gelblich-weißer Marmor verwendet worden, für die dazwischen etwas zurückgesetzten Orthostaktenplatten wiederum weißgeädertes und gestreifter grauer Marmor. An der

Sockelzone unterhalb der Kultnische des Marmorsaaes sind weiße und stark geäderte dunkelgraue sowie stark geäderte rote Marmorplatten symmetrisch angeordnet.“ (FILGIS & RADT 1986). Auf S. 73 ff. gibt Radt folgende Beobachtungen des Marmors wieder: „mittelgrau mit leichter hellgrauer Äderung, feinkörnig“; „mittelgrau mit kräftigen dunkelgrauen Adern, diagonal verlaufend, feinkörnig“; „hellgrau, nicht geädert, feinkörnig“.

Die Oberfläche des Objekts im Museum ist relativ stark verkrustet und somit nicht genauer erkennbar. Die zur Verfügung gestellte Probe besteht aus einem sehr feinkörnigen weißen Marmor mit einem Stich ins Gelbliche (vgl. Angaben in Tabelle 35).

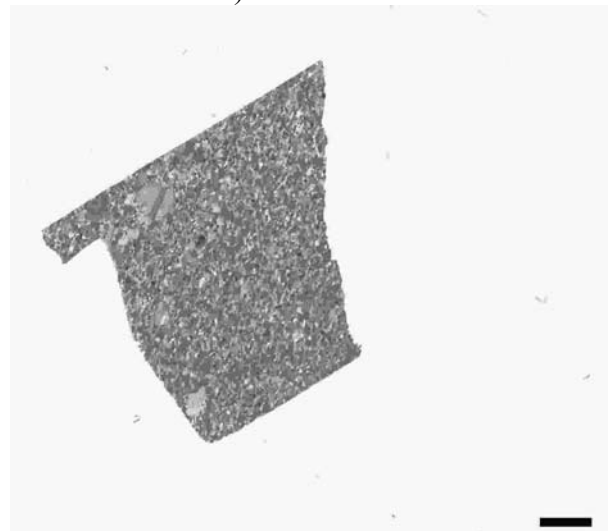


Abbildung 343: Feinkörniger Marmor aus Hymettos vom Waffenrelief des Marmorsaaes, N+, Maßstabsbalken 2 mm

Unter dem Mikroskop sind in der feinkörnigen Matrix (MGS 0,6, AGS 0,2 mm) 2 größere Kristalloblasten (1,2 mm) erkennbar (Abbildung 343). Beim Vergleich von Dünnschliffaufnahmen pentelischer, Carrara- und hymettischer Marmore ergibt sich eine fast vollständige Übereinstimmung mit letzteren. Beim Zermahlen ist ein Geruch nach H₂S wahrnehmbar, ebenfalls ein Merkmal hymettischer Marmore. Die Isotopie (δC 1,45 bis 1,65; δO -2,48 bis -2,88) fällt in das recht enge Feld von Hymettos, überlappt aber auch mit Carrara, Milas und den östlichen Bafasee-Marmoren (Abbildung 344). Dem geringen Mg-Gehalt von 0,23 Gew% entspricht die Abwesenheit von Dolomit. Anders als bei Carrara-Marmoren sind Quarz und opake Einschlüsse nur in Spuren vorhanden, Glimmer

überhaupt nicht. Auch die Spurenelementgehalte (Fe 226, Sr 109, Mn 7,7 ppm) sind mit Literaturangaben hymettischer Marmore kompatibel. Der höhere Fe-Gehalt ist möglicherweise für den gelblichen Farbton verantwortlich. Die SEE-Verteilungsmuster (Σ SEE 6,2, Σ SEE/Y 1,8, Y/Ho 98, Ce_{neg} 0,3) zeigen eine gute Übereinstimmung mit beiden hymettischen Proben und Literaturdaten (GRIMANIS & VASSILAKI-GRIMANI 1988). Sie ähneln jedoch auch denen eines modernen Carrara-Marmors, der als Standard bei der ICP-MS-Analytik eingesetzt wurde.

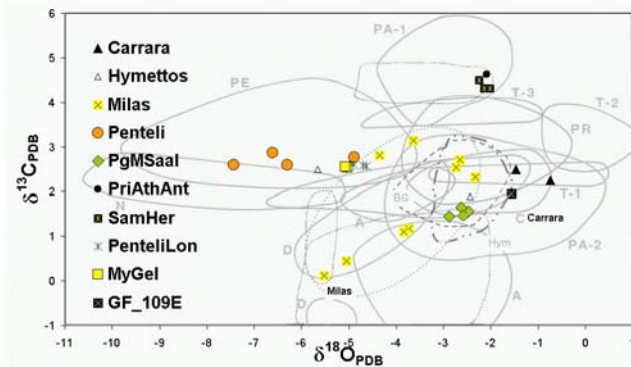


Abbildung 344: Isotopie feinkörniger Marmore des Waffenreliefs im Marmorsaal sowie von Lagerstätten und ihnen zugeordneten Objekten aus Marmoren von Carrara, Hymettos, Milas, Penteli und Phourni

Hymettische (Kapitel 6.5.6) und pentelische (Kapitel 6.5.5) Marmore wurden mindestens seit dem 6. Jh. v.u.Z. abgebaut; die von Carrara (Kapitel 6.6) seit dem 1. Jh. v.u.Z. (ATTANASIO 2003), erreichten ihren Gipfelpunkt aber erst in der Blütezeit des römischen Imperiums. Der Abbau der feinkörnigen Marmore von Afyon-Dokimeia (Kapitel 6.4.12) begann unter Augustus. Letztere sind 300 km landeinwärts gelegen, weshalb ein so früher Transport unwahrscheinlich ist. Ihre chemischen Elemente weisen eine breite Spannweite auf (MOENS *et al.* 1988a; MOENS *et al.* 1988b), aber die Isotopie des Waffenreliefs liegt auch außerhalb des erweiterten Dokimeionfeldes (GORGONI *et al.* 2002). Zudem zeigen selbst die weißen Afyon-Varianten fast immer gelbliche Bänderungen. Ohne dies näher zu erläutern, scheiden auch die Milas- und Bafaseemarmore aus.

Zusammengefasst müssen bei der Betrachtung feinkörniger klassischer Marmore folgende Unterscheidungskriterien berücksichtigt werden:

Carraramarmore weisen meist leicht gröbere und differenziertere Kristalle auf. Für gewöhnlich enthalten sie höhere Anteile akzessorischer Mineralien, vor allem Quarz, Glimmer und Do-

lomit. Zudem fehlt ihnen der charakteristische Geruch hymettischer Marmore. Pentelische Marmore besitzen höhere Fe- und Mn-Gehalte und sind ebenfalls geruchlos. Auch scheiden sie schon wegen ihrer Isotopensignatur aus. Gleiches gilt für die Phourni-Marmore, die sich von den ihnen am ähnlichsten pentelischen Marmore äußerlich schon aufgrund dünner Scharen dolomitischer Lagen deutlich abgrenzen lassen. Dokimeische Marmore sind ebenso wie die Milas-Marmore reicher an akzessorischen Mineralien und Spurenelementen.

Für hymettische Marmore ist die unregelmäßige graue Streifung charakteristisch, aber es gibt auch eine Variante, die schon von Lepsius (1891) als „Hymettos weiß“ bezeichnet wurde. Angesichts der oben wiedergegebenen Beschreibungen der Marmore im Marmorsaal ist anzunehmen, dass die untersuchte Probe lediglich eine hellere Charge dieses seit dem 6. Jh. v.u.Z. weitverbreiteten feinkörnigen Marmors darstellt.

Deshalb kann, gestützt auf petrographische, isotopische und geochemische Merkmale, eine hymettische Herkunft des Waffenreliefs als gesichert angenommen werden. Zudem finden sich auf der Akropolis untergeordnet weitere feinkörnige Marmore, die oft von unregelmäßigen gräulichen Adern durchzogen werden, so zwischen dem Athenaheiligtum und dem Großen Fries. Sie deuten darauf hin, dass es sich bei der Waffenreliefprobe nicht um ein zufälliges Einzelstück von Hymettos handelt.

7.7.15 Tempel R beim Oberen Gymnasium (römisch) (ZO Thasos-Aliki)

Der Tempel R beim Oberen Gymnasium enthält einen grobkörnigen Marmor, der auch an anderen Stellen der Akropolis auftritt, ansonsten aber nur untergeordnet vorkommt. Er fand beim Umbau des ursprünglich dorischen Tempels in einen ionischen Tempel Verwendung (SCHAZMANN 1923; SCHWANDNER 1990). Seine hellweiße Farbe ist mit einer wolkigen dunklen Tönung durchsetzt (Abbildung 346). Unter dem Mikroskop zeigt sich eine mehr homogene als heterogene Korngrößenverteilung, die Korngrenzen sind kurvig bis gezahnt, und nur wenige Anzeichen postmetamorphen Stresses wie Zwillinglamellen sind erkennbar (Abbildung 346). In dem Calcitmarmor (XRD-Dolomit 0,1

Gew%) kommen nur wenige akzessorische Mineralien vor (in der Dünnschliffprobe drei Quarzkörner, etwas kohlige Substanz und keine Glimmer). Beim Aufmahlen wird ein Geruch nach H₂S freigesetzt. Grobkörnige Marmore mit diesen Merkmalen (Abbildung 347) lieferten die Brüche von Thasos-Aliki seit dem 6. Jh. v.u.Z. in den gesamten ägäischen Raum (s. Kapitel 6.3). Sowohl die isotopischen (δC 3,0 – 3,1; δO +0,17 – +0,02) als auch geochemischen Daten bestätigen diese Herkunftsquelle (vgl. Tabelle 35). Zwar konnten nur 2 Proben aus den Brüchen von Aliki geochemisch untersucht werden. Sie stimmen jedoch mit der antiken Probe überein und bestätigen die Merkmals-homogenität dieser bedeutenden Marmorquelle. Gleiches gilt für eine Probe des Dodekastylos im Apollotempel von Didyma (Kapitel 7.5.4), der sowohl in dieser Arbeit als auch von anderen Autoren (BORG & BORG 2002a) Thasos-Aliki zugeordnet wird.

Das Isotopenfeld von Aliki ist recht klein und eindeutig (T-2 in Abbildung 349), doch eine untersuchte Probe weist einen niedrigeren δO -Wert auf (-1.93), der jedoch in das unlängst von GORGONI *et al.* (2002) erweiterte Isotopenfeld für Thasos-Aliki fällt. Deutlich ist es von den Werten der ebenfalls oft sehr grobkörnigen Naxos-Marmore unterschieden. Trotz einer weiten Spannbreite ihrer Absolutgehalte ist das Verteilungsmuster der SEE bei allen Proben untereinander sehr ähnlich (Abbildung 348), ähnelt aber auch dem prokonnesischer Marmore. Fe, Sr und Mg weisen geringe Gehalte auf, hingegen ist Mn recht hoch. Die Fe/Sr-Verhältnisse variieren, liegen jedoch unter 1.

Auch andere Autoren (HERRMANN & BARBIN 1993) gehen von der Verwendung thasischer Marmore in Pergamon aus.

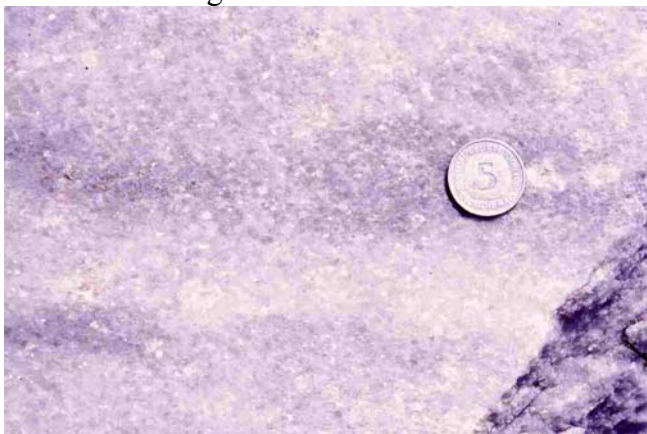


Abbildung 345: Grobkörniger Marmor des Tempel R auf der Akropolis von Pergamon

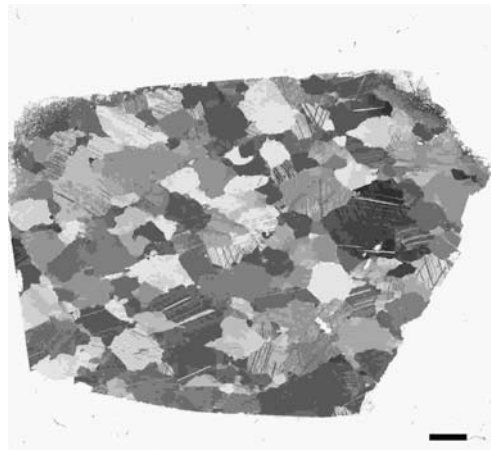


Abbildung 346: Grobkörniger Marmor vom Tempel R, N+, Maßstabsbalken 2 mm

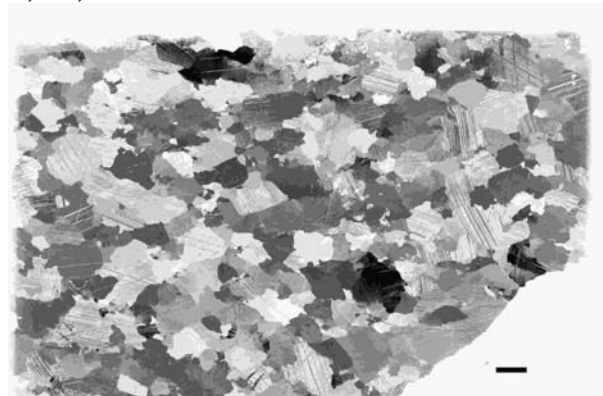


Abbildung 347: Marmor aus den Brüchen von Thasos-Aliki, N+, Maßstabsbalken 2 mm

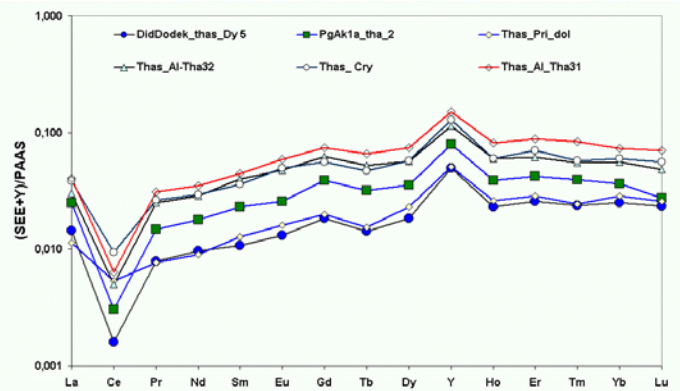


Abbildung 348: Sehr ähnliche SEE-Verteilungsmuster von Marmoren aus Thasos, nur die dolomitische Probe weicht ab

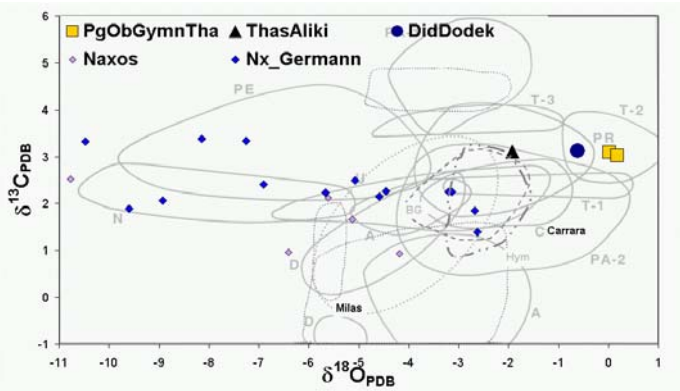


Abbildung 349: Isotopie der grobkörnigen Marmore aus Thasos-Aliki und von Naxos

7.8 Ilion-Troja: Athenatempel, Metope (ZO Prokonnesos)



Abbildung 350: Heliosmetope des Athenatempels von Troja im Pergamonmuseum

Die Datierung des Athenatempels in Troja (s. Karte Abbildung 16) wird zwischen „Frühdatierern“ (lysismachäisch, um 300 v.u.Z.) und „Spätdatierern“ (augusteisch) kontrovers diskutiert. Dies ist vor dem Hintergrund der langen Geschichte mit Zerstörungen und Wiederaufbau bis in die Römerzeit verständlich. RUMSCHEID (1994), der u.a. aufgrund stilistischer Merkmale von einer augusteischen Datierung ausgeht, stellt jedoch auf S. 18 fest, dass für jedes Bauteil die Datierung einzeln festgelegt werden muß. Die untersuchte Helios-Metopenprobe (Abbildung 350) weist alle Merkmale prokonnesischer Marmore auf (Tabelle 30, Tabelle 25 und Tabelle 35), was aber für die Datierungsfrage nicht weiter hilft, da – wie in dieser Arbeit mehrmals nachgewiesen – prokonnesische Marmore bereits mindestens seit dem 3. Jh. v.u.Z. abgebaut wurden. In einer in Zusammenarbeit mit der Tübinger Troja-Forschungsgruppe entstandenen Publikation (ZÖLDFÖLDI & SATIR 2002) wird von einer Datierung des Athenatempels um 280 v.u.Z. ausgegangen (was den Angaben der meisten Autoren entspricht) und ebenfalls Marmara als wahrscheinlichste Bezugsquelle seines Marmors angegeben.

Die Beobachtungen unserer Arbeitsgruppe in Troja bestätigen die Verwendung verschiedener Marmore, darunter auch zahlreiche makroskopisch als prokonnesisch identifizierbare.

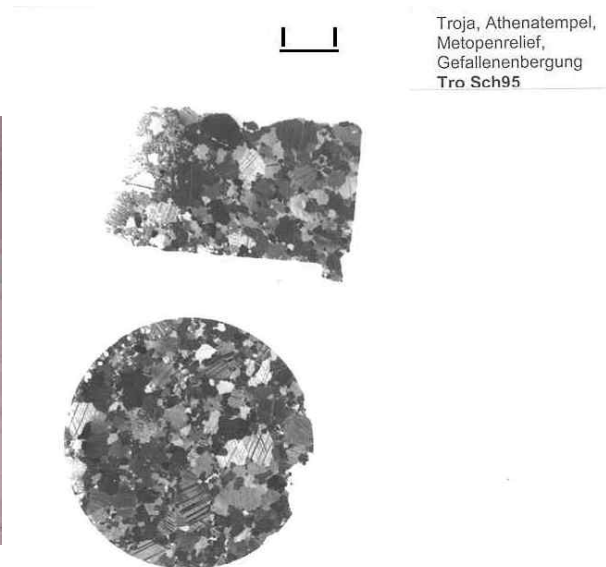


Abbildung 351: Prokonnesischer Marmor vom Athenatempel von Troja, N+, Maßstabsbalken 2 mm

SCHLIEMANN (1874) schreibt auf S. 7: „herrlicher Triglyphenblock aus parischem Marmor“. LAZZARINI *et al.* (1980b, S.45) favorisieren die Verwendung von Marmoren von Thasos/Kavala (Zigu) für Dach und Fundament des Athenatempels.

Wenn auch zu den feinkörnigeren (MGS 2,4, AGS 0,6 mm) prokonnesischen Marmoren gehörend, sind das heterogene Gefüge (Abbildung 351), die weißgraue Farbe (Munsell N8.5, die Probe ist zu klein, um eine eventuelle Bänderung feststellen zu können), der Geruch nach H₂S beim Zermahlen und der geringe Gehalt an akzessorischen Mineralien (wenig Quarz, kein Glimmer und Dolomit, einige feinverteilte opake Körner) deutliche petrographische Hinweise auf die prokonnesische Herkunft der untersuchten Metopenproben. Gestützt wird diese Zuordnung durch die Marmara-typischen geochemischen und isotopischen Merkmale: Σ SEE 1,4 ppm, Σ SEE/Y 0,9, ausgeprägte negative Cer-Anomalie von 0,37, Y/Ho 117, Mg 0,3 Gew% (XRD kein Dolomit), Fe 18,7 ppm, Mn 7,9 ppm, Sr 183 ppm, Fe/Sr 0,1 sowie δ O -0,5 und δ C 2,84 bis 2,88.

7.9 Ephesos: Hafenthermen (ZO Prokonnesos)

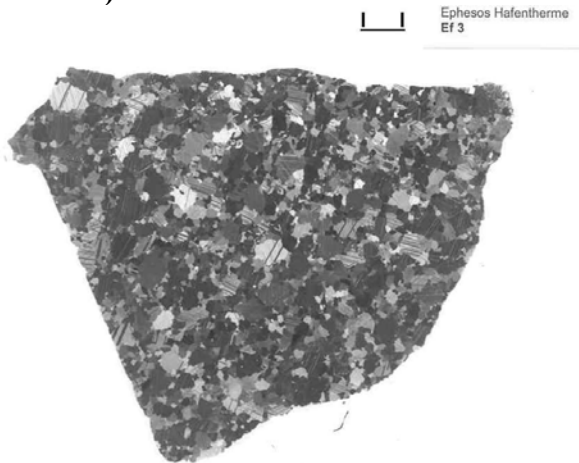


Abbildung 352: Prokonnesischer Marmor für Hafentherme von Ephesos, N+, Maßstabsbalken 2 mm

In den Hafenthermen von Ephesos fanden ebenfalls prokonnesische Marmore Verwendung, wie schon der äußere Eindruck nahelegt. Dies läßt sich an dem untersuchten Kantenfragment ($10 \times 5 \times 4 \text{ cm}^3$) eines stark zersplitterten, 0,5 m hohen Kapitells der Außenarchitektur zwischen Hafenthermen und Arkadiane nachweisen, das neben zwei 0,5 mm breiten dunklen parallelen Bänderungen im Abstand von 25 mm weitere charakteristische Prokonnesosmarmormerkmale besitzt: ein heterogenes Korngefüge mit MGS bis 2,4 mm, Geruch nach H_2S beim Anschlagen, die PR1-Isotopie, niedrige Mn- und relativ hohe Sr-Gehalte (vgl. Tabelle 30, Tabelle 25 und Tabelle 35). Allerdings unterscheiden sich die untersuchten Proben in einigen Punkten von den meisten anderen Proben aus prokonnesischen Marmoren. Schon äußerlich ist ein leicht erhöhter Anteil an akzessorischen Mineralien erkennbar (Munsell N 8,5), insbesondere Quarz, Hellglimmerlagen und feinkörnige dolomitische Lagen sind mikroskopisch auffällig. Das Verhältnis aus $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ liegt zwischen 3 und 4, Y/Ho zwischen 74 und 78, die negative Cer-Anomalie ist fast vollständig verschwunden. Fe erreicht 90 ppm, so dass das Fe/Sr-Verhältnis auf 0,4 ansteigt. Mg-Gehalte um 0,7 Gew% gehören zu den höchsten gemessenen Werten bei den prokonnesischen Marmorartefakten. Dementsprechend weist auch die Kathodolumineszenzmikrofazies (Abbildung 64) ein etwas anderes Erscheinungsbild auf; der bläuliche Farbeinschlag bei geringer Intensität entspricht eher den Angaben in der Literatur für prokonnesische Marmore.

7.10 Athen: Eumeneshalle (Fragment von M. Korres / Athen) (ZO Prokonnesos)

Die Bemühungen Eumenes II (197-159 v.u.Z.), in der gesamten hellenistischen Welt größere Anerkennung zu erfahren, fanden auch in der Stiftung der nach ihm benannten Eumeneshalle in Athen ihren Ausdruck. Lange Zeit wurde behauptet, sie sei insgesamt aus pentelischem⁷⁹ oder hymettischem Marmor errichtet worden (u.a. TRAVLOS 1971). Letzteres gilt augenscheinlich in der Tat für den größten Teil der heute noch auf der Athener Akropolis vorhandenen graustreifigen, feinkörnigen Marmorplatten, die die aus groben lokalen Kalksteinen erbauten Mauern der Eumeneshalle abdecken. Demgegenüber stellt M. KORRES (1984, S. 204) fest: „Alle übrigen Teile der Halle bestehen aus weißem Marmor, allerdings nicht pentelischem, wie man bisher annahm, sondern einem anderen, völlig unterschiedlichem- mit größeren Kristallen und weniger leuchtend, mit graublauen Verfärbungen in gradlinigen Adern. Der Marmor entspricht in allen Einzelheiten dem Material, das an den Hallen der Athena Polias in Pergamon verwendet wurde...Eine genaue Herkunftsangabe des Marmors ist freilich nicht möglich, wir nehmen an, dass er irgendwo in der Nähe von Pergamon gebrochen wurde.“

Von dieser Marmorvariante ist heute an der Eumeneshalle nur noch wenig zu sehen, wie ich anlässlich einer Konferenz in Athen im Mai 2003 feststellen mußte. Trotzdem bot die offensichtliche Verwendung prokonnesischen Marmors für den Pergamonaltar hinreichenden Anlass zu überprüfen, ob auch für dieses bedeutende Geschenk des Attalidenherrschers Marmor aus der gleichen Quelle verwendet oder er „in der Nähe von Pergamon gebrochen“ wurde, bzw. ob sonstige Aussagen möglich sind. Bei den von M. Korres zur Verfügung gestellten Proben kann aufgrund ihrer Merkmale nun sowohl eine hymettische oder pentelische als auch

⁷⁹ „...weil das Propylon (im Demeterheiligtum) und auch die Stoen aus Trachyt gebaut sind und noch nicht aus weißem Marmor, der später bei den Bauten Eumenes II. und Attalos II. allmählich üblich wurde. Die Verwendung des schöneren und kostspieligeren Materials ist vermutlich in Pergamon eingeführt worden, nachdem Eumenes II. seine Stoa in Athen aus pentelischem Marmor erbaut und so die Schönheit dieses Materials kennen gelernt hatte.“ (DÖRPFELD 1910).

eine Herkunft von den Kozak-Marmorlinsen nördlich von Pergamon ausgeschlossen werden. Demgegenüber zeigen sie eine widerspruchsfreie Übereinstimmung mit prokonnesischen Marmoren.

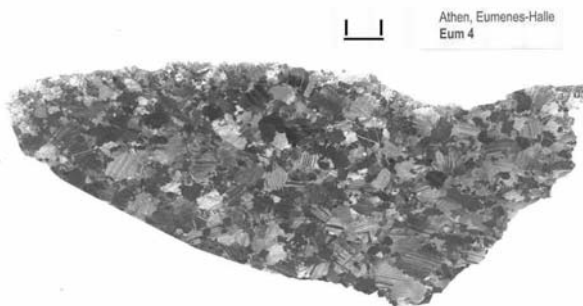


Abbildung 353: Wahrscheinlich Marmara-Marmor der Eumenes Halle in Athen, N+, Maßstabsbalken 2 mm



Abbildung 354: Dunkle Bänderung (oben) in Marmor der Eumenes Halle (lange Kante 9 cm)

Neben den von Korres beschriebenen äußeren Merkmalen, die ohne dass ihm dies offensichtlich bekannt war, denen von Marmara-Marmoren entsprechen, stimmt auch der petrographische und geochemische Befund einschließlich der Isotopie mit prokonnesischen Marmoren überein (vgl. Tabelle 30, Tabelle 25 und Tabelle 35): ein mittelkörniges (MGS 3,6 - 2,4 mm) heteroblastisches Gefüge der dolomitfreien Calcitmarmore mit Anzeichen starker Dynamometamorphose bei geringen Gehalten an Quarz, Glimmer und feinverteiltem opakem Material, Freisetzung von Geruch nach H₂S und eine im prokonnesischem Feld liegende Isotopie (δC 2,1/2,3 δO -2,9/-3,0). Ähnlich wie bei der Hafentherme von Ephesos sind auch die Fe-Gehalte (Abbildung 355) sowie das Verhältnis der $\Sigma SEE/Y$ (Abbildung 356) etwas höher als bei den meisten sonstigen untersuchten prokonnesischen Marmoren, was mit dem etwas höheren Anteil an akzessorischen Mineralien korrespondiert; der niedrige Mn-Gehalt von 5,5 ppm sowie die ausgeprägte negative Cer-Anomalie entsprechen hingegen dem typischem Marmara-Bild.

Möglicherweise stammen die Marmore für beide Bauwerke, die weniger einheitlich sind als die vom Großen Fries, aus den gleichen Steinbrüchen auf Marmara.

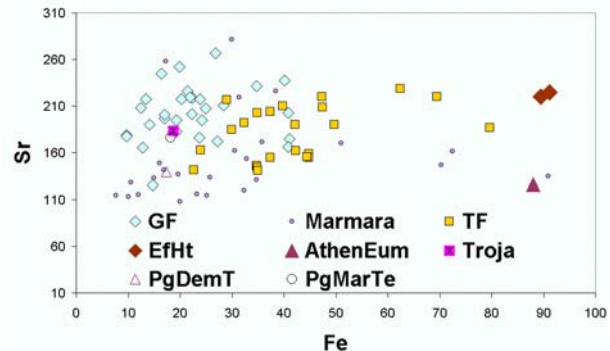


Abbildung 355: Sr zu Fe prokonnesischer Marmore. Eumeneshalle und Hafenthermen Ephesos weisen etwas erhöhte Fe-Gehalte auf

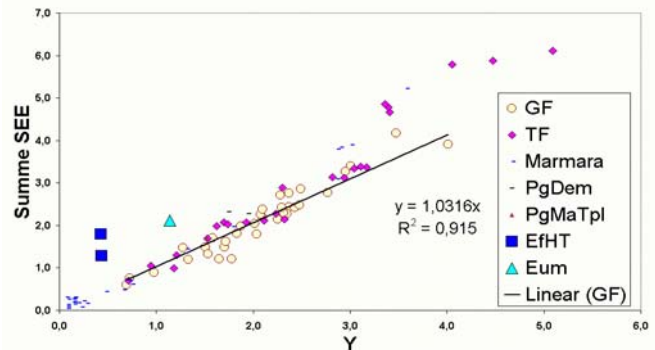


Abbildung 356: Summe der SEE über Y prokonnesischer Marmore. Ähnlich wie einige SEE-reiche Marmore des Telephosfrieses weisen Eumeneshalle und Hafenthermen von Ephesos $\Sigma SEE/Y$ -Verhältnisse > 1 auf

Allerdings soll nicht unerwähnt bleiben, dass auch für die Mani an der von Athen mit dem Schiff leicht erreichbaren dritten Südspitze des Peloponnes, das vor allem für seinen *rosso antico* bekannt ist, von der Lokalität Mezapos ein 1988 entdeckter antiker Abbau mit grau-weißen Marmoren beschrieben wird, deren Merkmale einschließlich der Isotopie durchaus beträchtliche Übereinstimmungen mit denen von Marmara aufweisen (GORGONI *et al.* 1992; BRUNO *et al.* 2002). Die Angaben zu ihren Fe- (110-185 ppm) und Mn-Gehalten (15-35 ppm) liegen jedoch sowohl über denen der prokonnesischen Marmore als auch denen der Eumenes-Halle. Somit kann auch die Eumenes-Halle in Athen mit hoher Wahrscheinlichkeit als Beleg für die frühe weite Verbreitung der Marmara-Marmore, wie auch für die engen Beziehungen der pergamenischen Herrscher und Werkstätten zu dieser Lagerstätte bereits in hellenistischer Zeit, angesehen werden.

7.11 Priene: Athenatempel Antenbasis (ZO Phourni)



Abbildung 357: Teile des Athenatempels von Priene im Pergamonmuseum

Das antike Priene war im Wesentlichen Marmorselbstversorger (s. Kapitel 6.4.7). In einem großen Teil der späteren archäologischen Literatur werden die Beschreibungen von WIEGAND & SCHRADER (1904) wiedergegeben: „Das Material der Tempels in den Fundamenten wie im Oberbau ist der gleiche grosskörnige, vielfach blau oder grau getönte Marmor der Mykale, welcher fast ausnahmslos für alle Bauten der Stadt gedient hat (S. 85).“ „...diese Vernachlässigung der Rückseite tritt auch in dem geringeren Material zu Tage: gerade hier finden sich vielfach geborstene Werkstücke, an deren Bruchflächen ziemlich dicke Glimmerschieferlagen erscheinen (S. 117)“. Spätere Gesteinsuntersuchungen (CARTER 1983) stellen die Verwendung verschiedener Marmorsorten fest⁸⁰, leider sind

⁸⁰ “The stone employed for the reliefs is white, almost entirely free of impurities. The crystals are uniformly medium to small in size and flat-bedded...It is clearly different from the betterknown marbles- the Parian or the more nearly comparable Pentelic...In fact the isotopic analysis indicates that it is sui generis among marbles to which that test has been applied so far...The stone of the reliefs is not altogether unlike that of the Temple’s architectural elements which is perhaps slightly more fine-grained, but has numerous veins of various colours, ranging from yellow to blue.Unfortunately, it has not been possible to apply the isotopic test to stone from the Temple. It would appear, nevertheless, that different stones were used for architecture and architectural sculpture, as was the case with the

z.B. die damaligen Isotopenanalysen nicht verfügbar (vgl. auch die Beschreibungen in Kapitel 6.4.7 von KOENIGS 1983). Auch die Merkmale eines noch früher untersuchten Fragments des Athenatempels (GERMANN 1981) stimmen exakt mit denen der lokalen Marmore überein (vgl. Abbildung 361 und Abbildung 362; Mg 1,2 Gew%, Sr 80, Fe 180, Mn 16 ppm).

Umso überraschender ist es, dass die jetzt untersuchte Probe der Antenbasis des Athenatempels vollkommen andere Merkmale aufweist, die denen der Probe vom Heraion von Samos und insgesamt den Phourni-Marmoren entsprechen (s. Tabelle 30).



Abbildung 358: Fragment der Antenbasis mit charakteristischen dünnen Dolomitlagen

An einem Fragment der Antenbasis im Archiv der Antikesammlung lassen sich deutlich abgegrenzte parallele Scharen dünner dolomitischer Lagen erkennen. Sie sind offensichtlich teilweise mit Hellglimmern assoziiert, denn die glatte Fläche in Abbildung 358 ist nicht das Ergebnis manueller Bearbeitung, sondern einer Abplattung entlang einer mit feinen Hellglimmerschuppen belegten mineralischen Inhomogenitätsfläche parallel zu den dolomitischen Lagen. Dieses auffällige und im Phourni-Kapitel detaillierter beschriebene Merkmal fiel zunächst weder an der zuerst untersuchten kleinen Athenatempelprobe noch an der ebenfalls kleinen Samos-Heraion-Probe weiter auf. Und obwohl die meisten Priene-Proben etwas grobkörniger sind und häufig graugefärbte Muster aufweisen, erschien zunächst auch die Verwendung einer nicht erfassten feinkörnigen Marmorvariante für die Antenbasis als möglich.

Mausoleum, but appearances, especially where stones are concerned, are often deceptive.”(CARTER 1983).

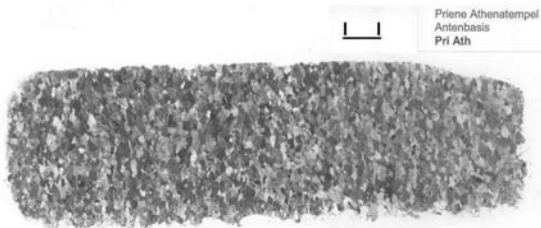


Abbildung 359: Phourni-Marmor im Athenatempel von Priene, N+, Maßstabsbalken 2 mm



Abbildung 360: Phourni-Marmor im Heraion von Samos, N+, Maßstabsbalken 2 mm

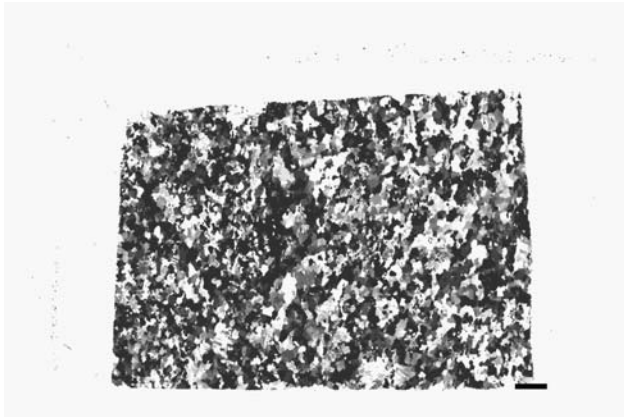


Abbildung 361: Fragment des Athenatempels aus lokalem Priene-Marmor (Dünnschliff GERMANN 1981), N+, Maßstabsbalken 2 mm

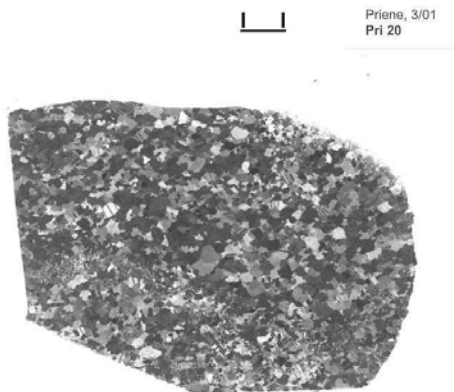


Abbildung 362: Lokaler weißer Marmor von Priene, N+, Maßstabsbalken 2 mm

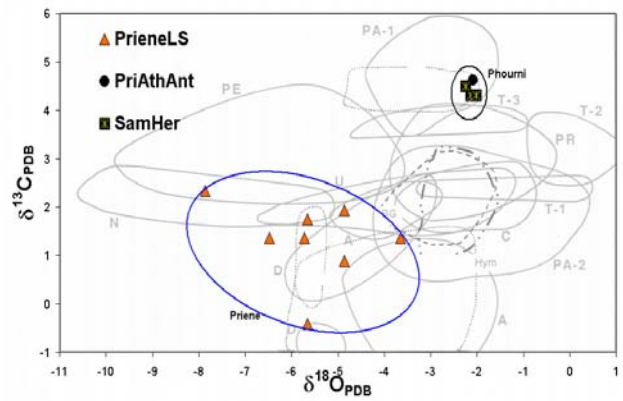


Abbildung 363: Isotopie der Marmore von Priene, des Athenatempels und des Heraions von Samos

Jedoch legten insbesondere die auffällige Isotopie mit δC -Werten über 4 und die übereinstimmenden geochemischen Daten nahe, dass einerseits die beiden Museumsproben aus dem gleichem Marmor bestehen und andererseits Priene-Marmore nicht verwendet wurden.

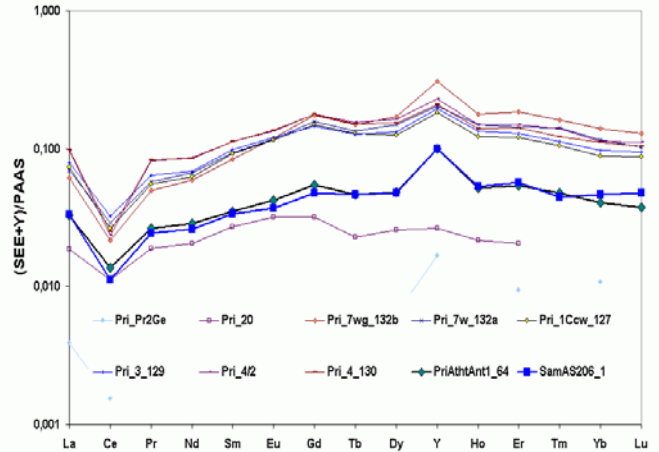


Abbildung 364: SEE der Marmore von Priene, des Athenatempels und des Heraions von Samos

Das übereinstimmende SEE-Verteilungsmuster wie auch die sonstigen geochemischen Daten beider Museumsproben unterscheiden sich nicht vollständig von den Priene-Marmoren, lediglich die Sr-Gehalte sind etwas höher.

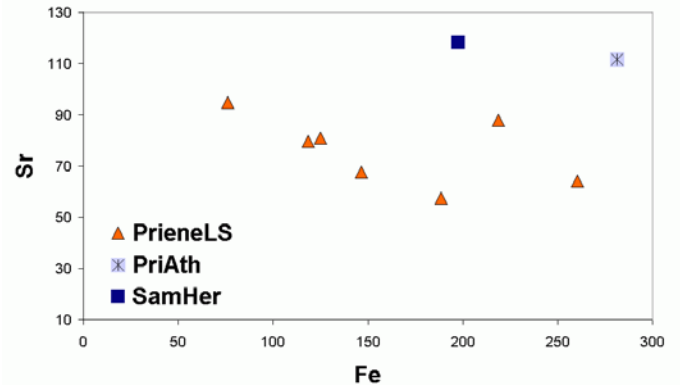


Abbildung 365: Fe-Sr der Marmore von Priene, des Athenatempels und des Heraions von Samos

Insgesamt kann unter Berücksichtigung aller erfaßbaren Merkmale – besonders der Petrographie und Isotopie – als gesichert angesehen werden, dass die Antenbasis nicht aus lokalem Priene-Marmor hergestellt wurde, sondern aus dem gleichen Marmor wie Teile des Heraions auf Samos, und dass deren gemeinsame Bezugsquelle die küstennahen Brüche der Phourni-Insel waren, die demnach bereits in archaisch bis frühhellenistischer Zeit ausgebeutet wurden.

7.12 Samos: Heraion, Säulenfragmente vom 2. Dipteros (ZO Phourni)

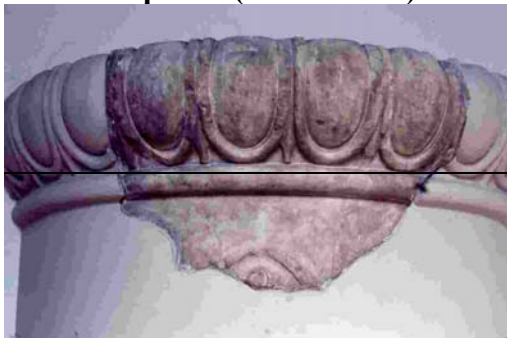


Abbildung 366: Fragment des Heraions von Samos

Die heute auf der Insel Samos zu findenden Überreste des Heraions geben nur einen schwachen Eindruck von der einstigen Größe und Bedeutung dieses unter Polykrates seit 538-522 v.u.Z. in Angriff genommenen Heiligtums mit einer mehrfach unterbrochenen 200-jährigen Baugeschichte, die in augustinish-römischer Zeit eine Fortsetzung fand. Offensichtlich wurden hierbei unterschiedliche Gesteine verwendet.

Drei in den Archiven der Antikensammlung aufgenommene Fragmente sind oberflächlich stark verschmutzt:

- Bei V 3.4-92 handelt es sich um eine kleine Spira (Säulenbasis) aus dunklem Marmor, die angeblich aus Myus stammen sollte, was Volker Kästner aber wohl zu Recht bestreitet.
- V 3.4-4 gehört zum älteren Dipteros des Heraion und ist ein erkennbar feinkörniges Gestein, angeblich ein Mergelkalk, der möglicherweise mit dem unten geschilderten Poros identisch ist.
- Das dritte Marmorfragment vom 2. Dipteros mit der Bezeichnung V 3.4-18 entspricht dem Fragment V3.3-65 (SK 1732), das als einziges petrographisch und geochemisch untersucht und Phourni zugeordnet werden konnte.

Abschließend wird als Beispiel, wie kompliziert und zugleich aufschlußreich sich die rein phänomenologische Beschreibung der unterschiedlichen in einem Großprojekt verwendeten Werksteine gestalten kann, folgende unvollständige Literaturlauswahl der Beschreibung der Marmore des Heraions wiedergegeben:

WIEGAND (1911) teilt auf S. 6f. mit: *"Der namentlich an den äußeren Säulen und gewissen Schmuckteilen verwendete Marmor ist großkristallinisch, von teils weißer, teils bläulicher Färbung. Antike Marmorbrüche befinden sich an mehreren Stellen der Insel."* Von REUTHER (1957) erfahren wir ab S. 21f. über die verschiedenen Baumaterialien: *"...Bei der Fortführung des Baus ging man dazu über, die Säulen ganz aus Marmor herzustellen. Die älteren marmornen Bauglieder - so die Basen der Pronaossäulen - sind aus einem Stein hergestellt, der zu Rissbildung neigt und, wenn er verwittert, an der Oberfläche schiefrig oder blättrig erscheint. Er ist weiß, hat in einigen Stücken eine schöne marmorgelbe Haut angenommen, weist aber andererseits viele schwärzliche Flecke und Adern auf, wohl auch Verwitterungserscheinungen. Dieser nicht sehr wertvolle Marmor findet sich neben Gneis und Glimmerschiefer auf Samos am Kerkimassiv. Aus einem festeren, großkristallinischen blaugrauen Marmor bestehen die Basen und Kapitelle der offensichtlich jüngeren Säulen der Westhalle. Dieser Stein steht auf dem Wege zwischen Tigani und Vathy an und findet sich auch an anderen Stellen der Insel, indessen ist der Bruch, der die Werkstücke für den Bau des Tempels geliefert hat, nicht gefunden worden ist."*

S. 41a: zu einer Spira: *"Weißer Marmor der von schwärzlichen Adern durchzogener Art von blättrig-schiefriger Struktur."*

S. 42a: zu einer Spira: *"Der Marmor ist der harte, kristallinische blaugraue Stein, der für alle Werkstücke im westlichen Teil des Tempels verwendet worden ist, soweit solche erhalten geblieben sind, und der wesentlich wetterbeständiger ist als der blättrig-schiefrige weiße Marmor, aus dem die Basen der Säulen des Pronaos der Prostase gemeißelt sind."*

S. 43a: zur stehenden Säule: *"Aus Marmor bestehen alle Teile der Säule sowie auch ihr Stylobatblock, der im Unterschied zu allen anderen noch liegenden nicht aus Poros besteht. Es ist derselbe Marmor, aus dem die Spiren und Kapitelle im Ostteil des Tempels bestehen, doch ist er von ungleich besserer Qualität und entstammt wohl tieferen Lagen des Bruches."*

S. 45b: zu zwei Säulentrommeln: *"Ein großes Stück ist beim Aufschlagen weggesprungen, und auch von der Lagerfläche ist der größte Teil abgesplittert, was auf die schiefrige Struktur des Marmors zurückzuführen ist."*

S. 43b: zu einem Eierstabglied: *"Der Marmor ist der gleiche weiße, von schwärzlichen Adern durchzogene Stein, aus dem auch die Spiren der Pronaos- und Osthallensäulen bestehen."*

S. 46b: zu einer Spira: "Vier Fragmente einer Spira aus blaugrauem, weiß geäderten Marmor der kristallinen Art..."

S. 47a: "Ein größeres Torusbruchstück aus weißem, blättrigem Marmor mit gelblichen und grauen Adern..."

S. 48b: "Drei zu ein und derselben Trommel gehörige Fragmente aus weißem, mit gelblichen Adern durchsetztem Marmor..."

S. 49a: "In die römische Basis - bei der Nordostecke des Tempels - wurde bei ihrem Umbau zu einer "Wasserkunst" das große Bruchstück einer Säulentrommel aus weißem, glimmerhaltigem, von schwärzlichen Adern durchzogenem Marmor verbaut."

S. 49a: zu einem Eierstabechinus: "...obwohl der schwärzlich und gelblich geäderte Marmor, wie die Bruchfläche zeigt, besonders schiefrig ist."

S. 50a: zu einem Kapitell: "Der harte und spröde blaugraue, kristallinische Marmor ist mit muscheligen Bruchstellen abgesprungen."

S. 50b: zu einem Kapitellhals: "Es ist weißer Marmor, der zwar nicht das großkristallinische Gefüge des harten blaugrauen Steines zeigt,..., sondern die schiefrige Struktur der Kapitellhalse..."

Zum Berliner Stück:

S. 52aff. Nr. 28: fünf (sechs?) Bruchstücke (A-E) zu mindestens drei Exemplaren; Fragment F: "Auch ist der Marmor ein anderer Stein als der, aus dem diese (die Fragmente A-E, Anm. d. Verf.) gearbeitet sind und der demselben Bruch entnommen ist, der auch das Material für die Werkstücke der Ostfront geliefert hat. **Er hat nicht die blättrige schiefrige Struktur wie diese, ist aber auch nicht der kristallinische blaugraue Stein, aus dem die Spiren und das Kapitell der Westhalle bestehen, sondern feinkörniger als dieser.**"

HELLNER (2002) hat mit dem Ziel der Erforschung der Bauphasen in der 200-jährigen Baugeschichte an 585 Fragmenten 60 Spiren und 45 Tori rekonstruiert „was bei insgesamt 155 Basen des Tempels einer Anzahl von etwas weniger als der Hälfte der Spiren und etwa einem Drittel der Tori entspricht“. Aus dem ähnlichen Format der Bruchstücke schließt er, dass „die Steintrommeln wahrscheinlich schon seit der Spätantike alle zerschlagen wurden, um in Öfen zu Kalk verbrannt zu werden.“ Er unterscheidet drei verwendete Baumaterialien aus Stein: „Die erste Gruppe der Fragmente besteht aus **Poros**, die weiteren fünf Gruppen aus **weißem Marmor**, die letzten acht Gruppen aus **graublauem Marmor**.“ Leider finden sich in HELLNER (2002) weder Hinweise zu Infrage kommenden Steinbrüchen noch detailliertere Untersuchungen zu den Gesteinen selbst.

Steinbrüche, deren Material im Heraion von Samos verwendet wurde (s. Kapitel 6.5.3):

KIENAST (1992) beschreibt mehrere von ihm aufgesuchte Steinbrüche, deren Material im Heraion Verwendung fand:

- 1.) Ein schon seit längerem bekannter, aber erst durch Schilderungen aus der Bevölkerung wieder in Erinnerung⁸¹ gerufener **Poros**-Steinbruch befindet sich auf einem Höhenrücken östlich des Stadtmauerbergs. Bis zu 50 m tiefe Höhlen wurden im Kammerpfeilerverfahren in den Berg getrieben, der Transport der Steinblöcke – die für den Rhoikos-Tempel Verwendung fanden - konnte leicht über den gleichmäßig geneigten Hang erfolgen.
- 2.) Westlich von Manolates auf der N-Seite von Samos befindet sich der einzige Steinbruch, auf dem bis 1992 **antiker Marmorabbau** sicher nachgewiesen worden war. Die Negative von Säulentrommeln passen eindeutig zu denen des 2. Dipteros. Unwegsamkeit des Geländes, geringe Ausmaße des Bruches, Dürftigkeit und schlechte Qualität des Marmors belegen nach Kienasts Ansicht die Not der Bauherren, geeignetes Material heranzuschaffen, weshalb sie auch gezwungen waren, kleine und abgelegene Bruchstätten aufzusuchen.
- 3.) Am Küstenrand, 2 km vom Heiligtum entfernt, befindet sich in westlicher Richtung ein Bruch, in dem **Kalkstein minderer Qualität** gebrochen wurde. Zwar seien keine eindeutigen Hinweise auf die Verwendung zu finden; die aus den Schrotgräben abzulesenden Blockmasse sowie das Material sprächen aber für eine Nutzung in der letzten Bauphase bei der Außenperistase des 2. Dipteros.
- 4.) Unmittelbar östlich der Ortsgrenze des Dorfes Heraion befinden sich Abbaufelder von **Kalkmergelplatten**, an denen aufgrund der Gesteinsstruktur keine konkreten Abbauspuren auszumachen seien. Der Gedanke, dass hier Material für die Rhoikos-Basen gewonnen wurde, drängt sich geradezu auf.
- 5.) Ein weiterer Steinbruch befindet sich auf den **Phourni-Inseln** und wird im Kapitel 6.5.2 detaillierter beschrieben. Er wurde von A. Peschlow-Bindokat im Zusammenhang mit ihren Studien Anfang der 80er Jahre wieder entdeckt. Seine „drei Abbaustellen lieferten offenbar einen qualitativollen, gelblich weißen Marmor“. Zwar standen die von Kienast erwähnten Isotopenanalysendaten, die am Danish Geological Institut vorgenommen wurden, nicht zur Verfügung. Es hat sich aber trotzdem gezeigt, dass dieser Steinbruch sowohl ergänzendes Baumaterial für das Heraion als auch für den Athenatempel in Priene lieferte.

⁸¹Die von Kienast angegebene Literatur (POCOCKE 1745; FABRICIUS 1884) konnte nicht aufgefunden werden.

Merkmale der Phourni-Marmore (s. Kapitel 6.5.2)

Einen ersten Hinweis für die Phourni-Herkunft des untersuchten Heraion-Fragments gab Herr Kienast telephonisch, als er über die festgestellten Merkmale der feinkörnigen Marmore des Priene-Athenatempels und des Heraions unterrichtet wurde (s. Tabelle 30). An Dünnschliffen von Proben der Phourni-Steinbrüche und dem Heraion, die Anfang 1980 von A. Peschlow-Bindokat zur Verfügung gestellt worden waren, zeigte sich ihr unverwechselbares gemeinsames petrographische Merkmalsmuster: dünne, gelblich erscheinende Dolomitscharen in der feinkörnigen Calcitmatrix, teilweise Kornorientierung, geringe Anteile an sonstigen akzessorischen Mineralien (Quarz, Glimmer, Pyrit, Limonit und kohlige Einschlüsse). Diese Merkmale decken sich vollständig mit den Beobachtungen von LAZZARINI & CANCELLIERE (2000), die die Phourni-Marmore petrographisch und isotopegeochemisch untersucht haben. In das von ihnen aus 6 Messwerten ermittelte Isotopenfeld mit charakteristisch hohen δC -Werten (δC 3,8 – 4,9, δO –2,7 - -3,9) fallen auch die jetzigen Iso-

topiemesswerte vom Heraion und der Antenbasis des Athenatempels von Priene (δC zwischen 4,31 und 4,62; δO zwischen -2,02 und -2,24), auch wenn letztere nahe legen, dass das von ihnen ermittelte Sauerstoffisotopenfeld in Richtung schwererer Isotopen erweitert werden muss.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass auf **Samos verschiedene Kalksteine und Marmore unterschiedlicher Qualität** verwendet worden sind. Die von den oben ausführlich zitierten Autoren gemachten Beobachtungen legen den Schluss nahe, dass die **Phourni-Marmore ergänzend** verwendet worden sind, da die Steinbrüche auf Samos den beträchtlichen Werksteinbedarf nicht decken konnten. Ähnliches wurde auch bei anderen Großprojekten festgestellt, wie dem Apollontempel in Didyma (BORG & BORG 2002a). Dieser Befund legt aber auch nahe, dass zwischen Samos, Phourni und Priene eine engere Beziehung bestanden haben musste. Und er zeigt, dass die aufgrund heutiger Abbauspuren erfolgte Annahme, Phourni sei erst in römischer Zeit ausgebeutet worden, nicht zutreffen kann.

8 Marmordiagnosesystem „MarbExpert“

Im vorangehenden Kapitel wurde an Fallbeispielen verdeutlicht, dass bei der Herkunftsbestimmung von in der Antike verwendeten Marmoren in der Regel ein ganzes Bündel an Merkmalen und Voraussetzungen Berücksichtigung finden muß. Wie in Abbildung 367 zusammenfassend dargestellt, sind sie zum einen materialinhärent und vorwiegend geologischer

Natur (äußere Merkmale, Petrographie, Geochemie, Isotopie) und zum anderen von anthropogenen und damit archäologisch relevanten Faktoren (Abbauzeitraum und Erreichbarkeit der Marmorlagerstätten, logistische Rahmenbedingungen, sozioökonomische Situation der antiken Reiche) bestimmt (vgl. auch besonders Kapitel 1.2 und 5).

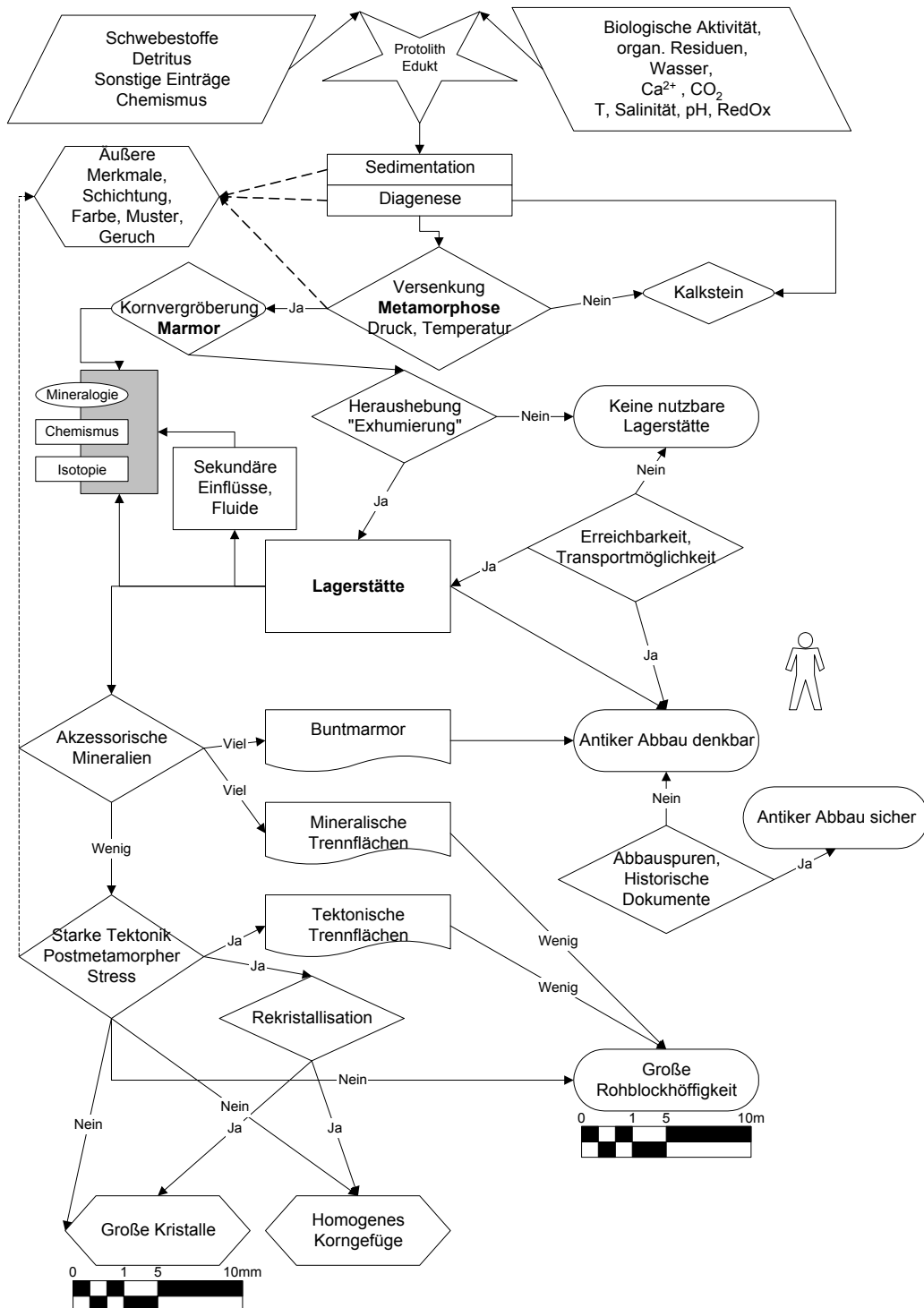


Abbildung 367: Flußdiagramm zum Zusammenhang geogener Einflußgrößen auf Marmoreigenschaften und Nutzung in der Antike

Anhand der für 17 verschiedene Marmorlagerstätten erarbeiteten Datenbasis wurde abschließend ein computergestütztes sogenanntes Expertensystem entwickelt. Es wurde in die Shell eines im Internet verfügbaren Expertensystems (Expert System Builder entwickelt von CASWELL 2001) implementiert und besteht aus einem *User Interface* UI (für den Nutzer), einem *Question Editor* QE (für die Erstellung der 30 Fragen in Tabelle 38) und einer Marmorlagerstättendatenbank, dem *Knowledge Editor* oder der *Knowledge Acquisition* (KA). Neben der einfachen Handhabbarkeit für den Nutzer ohne Programmierkenntnisse hat das System den Vorteil, dass nicht nur Entweder-Oder-Optionen zur Verfügung stehen, sondern auch „unscharfe“ Merkmale sowohl für die Erstellung der Datenbank als auch vom Nutzer eingegeben werden können. Dies wird durch die Verwendung eines auf „Fuzzy Logik“ basierenden Algorithmus erreicht, der der Realität näherkommt, in der nicht nur die Lagerstättenmeßdaten eine breite Spannweite aufweisen, sondern auch die qualitativen Beschreibungen nicht immer eindeutig sein können und oft nur schwer in metrische Distanzmaße umsetzbar sind.

Obwohl das System in der Erprobungsphase auch für komplizierte Zuordnungsfragen gute bis sehr gute Aussagen getroffen hat, läßt es sich sicherlich noch für die jeweilige Lagerstätte und spezifische Fragestellung optimieren. Auch hier gilt, dass die vorgeschlagenen Ergebnisse immer kritisch zu überprüfen sind. Ein zentrales Anliegen ist, den Nutzer zu ermuntern, von sich aus die entsprechenden Fragen zu stellen und – wie schon bei den äußeren Merkmalen auf Seite 32 betont – entsprechende Beobachtungen vorzunehmen. In diesem Sinne ist es vor allem als Untersuchungs- und Entscheidungshilfe zu verstehen.

User Interface (UI) und Knowledge Acquisition

Im „*User Interface*“ stellt das Programm dem Anwender (z.B. einem Archäologen) eine Reihe von Fragen (s. Tabelle 38), aus deren Beantwortung das System ein Ranking der abgespeicherten potentiellen Lagerstätten errechnet. Im Screenplot Abbildung 368 wird z.B. für eine Probe des Telephosfrieses eine Herkunftswahrscheinlichkeit von 97% aus Marmara (Prokonnesos) angegeben. Durch Anklicken des Buttons

„*Explain*“ können die Wichtungen für die einzelnen Records (= Marmorlagerstätten) eingesehen werden.

Posn	Record Name	Conf %
1	MARMARA	97.19%
2	PAROS 2 W MARBLE VALLEY	64.63%
3	LESBOS MORIA	62.99%
4	APHRODISIAS	60.84%
5	HERAKLEIA (BAFA GÖLÜ)	60.64%
6	MILET WEST	60.20%
7	HYMETTOS	59.89%
8	PAROS LYCHNITES	54.18%
9	MILET OST	54.06%
10	EPHESOS_AYTEKIN	51.16%
11	EUROMOS	50.88%
12	MYUS LS28	49.45%
13	CARRARA	46.65%
14	PENTELI	42.90%
15	PRIENE	42.12%

Selected Record = MARMARA

Action

- homogeneous (colour, minerals) [NO]
- inhomogeneous pattern (banding, streaks, layers, spots) [YES]
Resultant Score = 20.00 From a MAX of 20.00
- [Question 3] [Importance = HIGH]
How do the pattern occur? [Type = Multiple]
- parallel grey banding [YES]
- irregular grey banding [NO]
- thick dolomitic layers (boudinage, positive erosion relief, mostly finer grained, often yellowish) [NO]
- thin dolomitic layers [NO]
- dolomitic spots [NO]
- thin grey layers [NO]
- thin red layers [NO]
- dark spots [NO]
- whitish pattern in a dark marble [NO]
Resultant Score = 14.44 From a MAX of 20.00
- [Question 4] [Importance = NORMAL]
Which characteristics do the dark marbles show? [Type = Single]
[This question was NOT asked/answered]

Exit

Abbildung 368: Screenplot der Ergebnisse des UI und Ausschnitt aus der Erklärung für den Datensatz Marmara einer Probe des Telephosfrieses

Bei jedem Antwortschritt kann durch Anklicken des Buttons „*Show Analysis*“ verfolgt werden, wie sich das Ranking verändert. So wird die Antebasis der Athenahalle von Priene bereits nach Frage 6 (Abbildung 370, Farbe, dolomitische Bänder, Feinkörnigkeit usw.) den Phourni-Brüchen zugeordnet, aber noch dicht gefolgt von anderen feinkörnigen und leicht gemusterten Marmoren (Carrara, Penteli). Nach der letzten Frage (Nr. 30) ist der Abstand bereits deutlich größer (Abbildung 372). Die Tatsache, dass sich nun Ephesos-Aytekin nach vorne geschoben hat, ist vor allem der starken Wichtung der relativ seltenen schweren Kohlenstoffisotopie (δC jeweils >4) geschuldet.

Frage 1 und 26 in Abbildung 369 sind Beispiele, in denen der Nutzer nur eine Antwortoption (einschließlich *don't know* bei Frage 26) anwählen darf, bei Frage 3 kann für jede Option zwi-

schen „ja, vielleicht, neutral, unwahrscheinlich und nein“ abgestuft werden.

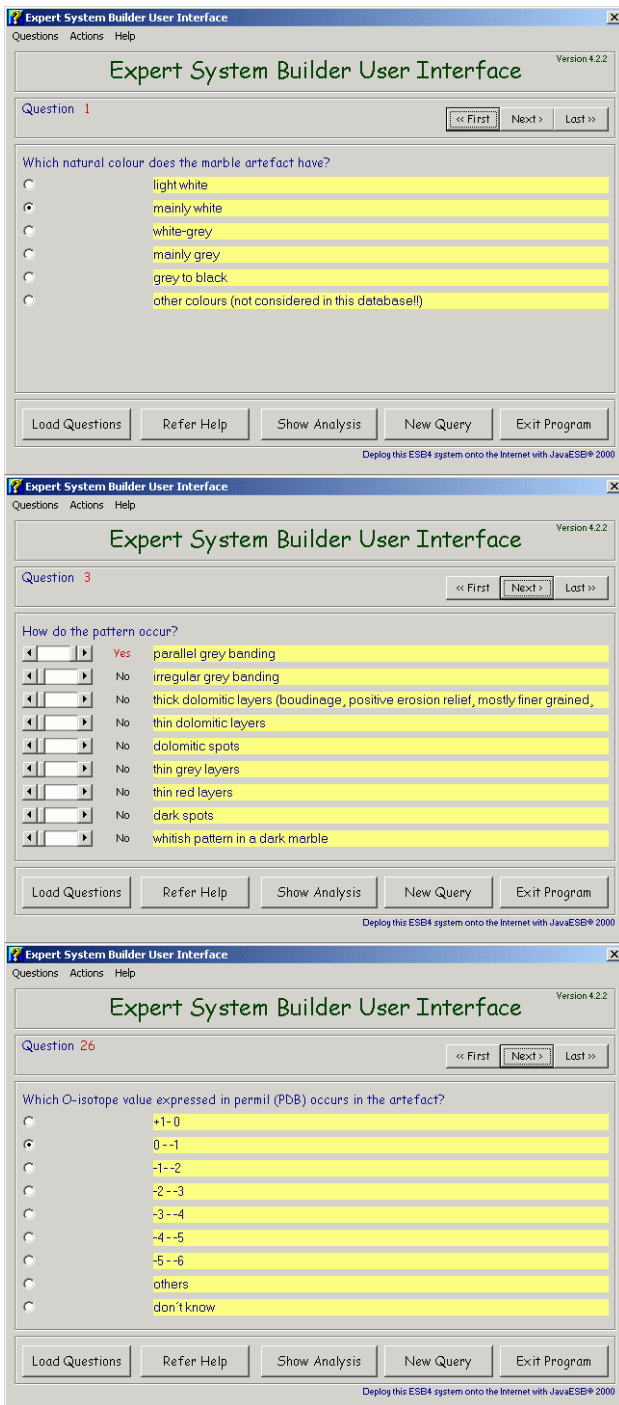


Abbildung 369: Eingaben zu Farbe, Mustern und Isotopie der Telephosfries-Marmorprobe im UI

Frage 30 in Abbildung 371 verlangt eine eindeutige Antwort auf die archäologisch relevante und wohl auch beantwortbare Frage nach dem Entstehungszeitraum (der Datierung) des antiken Objekts. Sie ist in der KA mit der Frage nach dem Abbauzeitraum der Marmorbrüche verknüpft. So wird z.B. für Carrara (Abbildung 373) eine Zeitspanne seit dem Römischen Impe-

rium bis heute angegeben. Es gibt aber Hinweise darauf, dass zumindest lokal Carrara-Marmore schon früher Verwendung fanden. Dem könnte z.B. durch Verschiebung des Reglers von No auf eine mittlere Stufe Rechnung getragen werden.

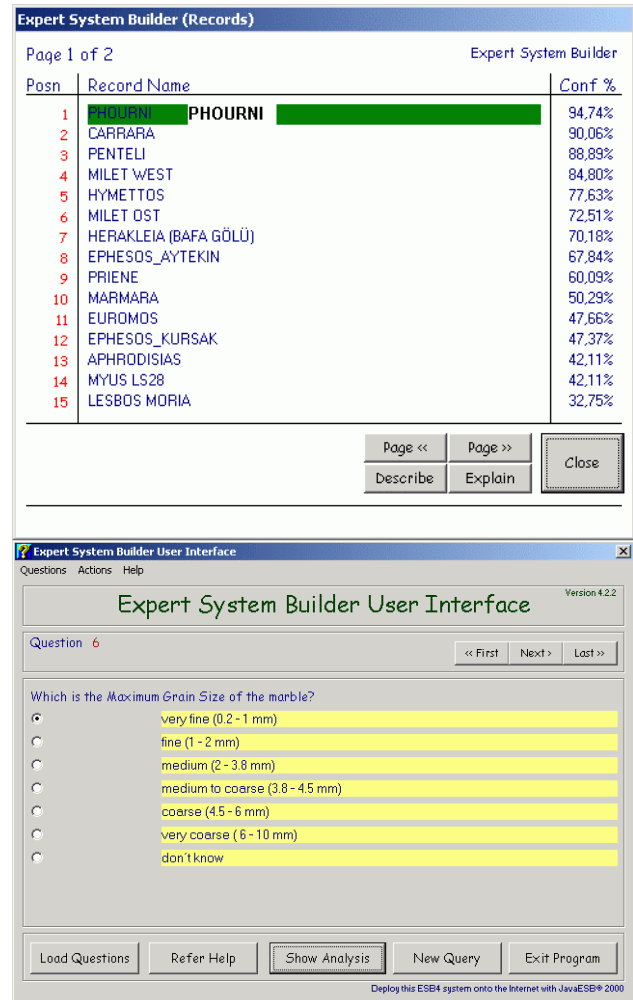


Abbildung 370: Zuordnung der Athenatempelprobe zu Phourni nach Eingabe weniger äußerer Merkmale

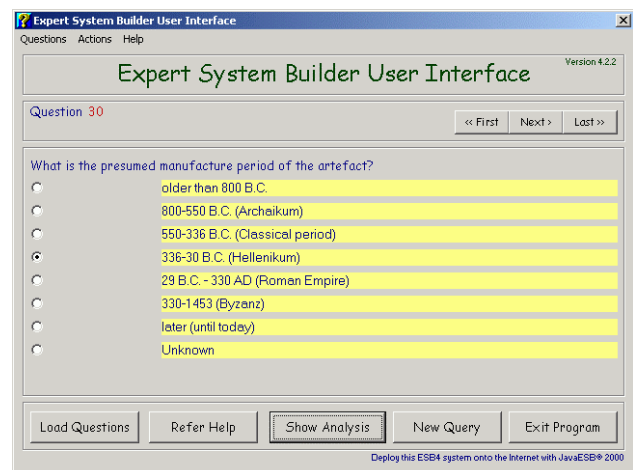


Abbildung 371: Mögliche Antwort auf Frage 30 nach dem Herstellungszeitraum des Artefakts im UI

Expert System Builder (Records)

Page 1 of 2 Expert System Builder

Posn	Record Name	Conf %
1	PHOURNI	94,80%
2	EPHESOS_AYTEKIN	82,70%
3	MILET WEST	76,65%
4	PRIENE	69,73%
5	CARRARA	68,33%
6	MILET OST	67,47%
7	PENTELI	67,01%
8	EPHESOS_KURSAK	66,01%
9	HERAKLEIA (BAFA GÖLÜ)	63,33%
10	PAROS LYCHNITES	61,75%
11	HYMETTOS	61,48%
12	PAROS 2'W MARBLE VALLEY	57,22%
13	LESBOS MORIA	56,40%
14	MYUS LS28	55,21%
15	APHRODISIAS	54,15%

Page << Page >> Describe Explain Close

Abbildung 372: Deutlichere Zuordnung zu Phourni nach Durchlaufen der gesamten Fragensequenz

Expert System Builder Knowledge Acquisition

Version 4.2.2

Record Name: CARRARA Question 30 << First Next Last >>

PHOURNI district?

<input type="checkbox"/>	No	336-30 B.C. (Hellenikum)
<input type="checkbox"/>	Yes	29 B.C. - 330 AD (Roman Empire)
<input type="checkbox"/>	Yes	330-1453 (Byzanz)
<input type="checkbox"/>	Yes	later (until today)
<input type="checkbox"/>	Yes	Unknown

Load Record Save Records Delete Record View Records New Record
Load Questions Refer Help Describe Recd Exit Program

Abbildung 373: Abbauzeitraum von Carrara-Marmoren in der KA

Question Editor (QE)

Expert System Builder Question Editor

Version 4.2.2

Knowledge Engineer Question Multiple Single Question 22 << First < Prev Next > Last >>

Which is the Fe/Sr ratio

System User Question Multiple Single Copy KE Question to User Question

Which is the Fe/Sr ratio

1	0.01 - 0.5
2	0.5 - 1
3	1 - 1.5
4	1.5 - 2
5	2 - 2.5
6	2.5 - 3
7	3 - 5
8	5 - 10
9	don't know

Create Reliance Save Questions Load Questions Add Help Quit ESB

Reliant on Questions 21 21 21 21 21 21 21 21 Question and Options 1 2 3 4 5 6 7 8 Question Importance Normal Medium High

Abbildung 374: Screenplot des QE mit aktivierter Abhängigkeit

Herzstück des Systems ist der Question Editor. In ihm werden Fragen und Optionen formuliert, die für die Datenbank der Marmorlagerstätten (den Knowledge Editor) und den Nutzer (im User Interface) relevant sind. Da die Spannweite von Merkmalen innerhalb einer Marmorlagerstätte i.d.R. breiter ist, werden in der KA meist multiple Optionen gesetzt. Im UI genügt meist eine Option, da ja nur wenige Beobachtungen oder Messwerte zur Verfügung stehen. Zusätzlich kann eine unterschiedliche Wichtung eingegeben werden, ebenso die Festlegung, ob eine Frage nur gestellt werden soll, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. So erfolgt z.B. die Frage nach dem Fe/Sr-Verhältnis (Abbildung 374) nur bei positiver Antwort auf die Frage, ob chemische Analysen vorliegen. Desweiteren wurde bei fast jeder Frage (und Lagerstätte!) die Option „don't know“ mit Maximalbewertung hinzugefügt, um bei fehlender Kenntnis des Nutzers alle Lagerstätten gleich zu behandeln.

Marbles of which colour have been produced by the quarrying district? (<i>Frage in KA</i>)	
Multiple (<i>Mehrere Frageoptionen</i>)	
Which natural colour does the marble artefact have? (<i>Frage in UI</i>)	
Single (<i>nur einfache Antwortoption</i>)	
light white	<i>Merkmale (hier Farbe)</i>
mainly white	"
white-grey	"
mainly grey	"
grey to black	"
other colours (not considered in this database!!)	
Null	<i>(keine Frage gestellt)</i>
Null	
Null	
5	<i>(insgesamt 6-1 von 9 möglichen Optionen)</i>
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,AND	
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,	<i>(Verknüpfung mit keiner Frage und keiner möglichen Option)</i>
E:\Programme\ESB4\Marmor\content.html	<i>(Speicherplatz der Hilfsdatei)</i>
1.5	<i>(Wichtung der Frage: 1 normal, 1.5 mittel, 2 hoch)</i>

Tabelle 37: Struktur des Question Editors im Expertensystem

In Tabelle 37 wird die Struktur des Question Editors anhand der ersten Frage – nach der Farbe – dargestellt und (kursiv) erläutert. Zu jeder Frage und auch Lagerstätte kann eine im HTML-Format abgespeicherte und im Internet zur Verfügung stehende erläuternde Hilfsdatei erstellt werden.

Die Eingaben im Question Editor werden in einer mit der Endung .qst versehenen Datei (hier *marmor14.qst*) abgespeichert, die mit jedem Texteditor geöffnet und auch verändert werden kann. Letzteres empfiehlt sich allerdings nicht, da schon die kleinste Unstimmigkeit die gesamte Datei unbrauchbar macht. Tabelle 38 gibt in gekürzter Form sämtliche Fragen und Optionen (ohne *don't know*) wieder.

Wie die in der KA festgelegten Merkmale in der Datei *marmor14.dat* (der Name muss identisch mit der des QE sein) abgespeichert werden, zeigt am Beispiel Marmara Tabelle 39.

Hinweise zur praktischen Nutzung von MarbExpert finden sich Anhang (0).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit Hilfe des wissensbasierten Systems MarbExpert, das auf einer multivariaten Merkmals- und Wissensdatenbank aufbaut, auch der Nichtgeowissenschaftler in der Lage sein sollte, wichtige Hinweise und Entscheidungshilfen für die Provenienzanalyse zu generieren.

Marbles of which colour have been produced by the quarrying district?	20. 0.1-10 ppm / 10 - 20 ppm / 20 - 30 ppm / 30-50 ppm / 50-80ppm / 80-100 ppm / > 100 ppm
1. <i>light white, mainly white, white-grey, mainly grey, grey to black, other colours (not considered in this database!!)</i>	How much Sr occurs?
Marbles of which pattern (design, fabric) occur in the marble quarry location?	21. < 50 ppm / 50 - 100 ppm / 100 - 200 ppm / 200 - 250 ppm / 250 - 300 ppm / 300 - 400 ppm / > 400 ppm
2. <i>homogeneous (colour, minerals), inhomogeneous pattern (banding, streaks, layers, spots)</i>	Which is the Fe/Sr ratio
How do the pattern occur?	22. /0.01 - 0.5 / 0.5 - 1 / 1 - 1.5 / 1.5 - 2 / 2 - 2.5 / 2.5 - 3 / 3 - 5 / 5 - 10
3. <i>parallel grey banding/ irregular grey banding / thick dolomitic layers (boudinage, positive erosion relief, mostly finer grained, often yellowish) / thin dolomitic layers / dolomitic spots / thin grey layers / thin red layers / dark spots / whitish pattern in a dark marble</i>	Which is the sum of REE to Y ratio (SuREE/Y)?
Which characteristics do the dark marbles show?	23. 0.5 - 1.3 (very much Y in relation to total REE) / 1.3 - 2 / 2 - 3 / 3 - 4 / 4 - 5 / 5 - 6 / > 6 (very few Y in relation to total REE)
4. <i>irregular pattern, light spots etc. / rounded, clear shapes of fossil remains /</i>	How much is the negative Cer-anomaly relative to PAAS?
Which crystal-size distribution is typical for the marble of the quarrying area?	24. / 0.1 - 0.3 (very strong depletion of Cer relative to La and Pr) / 0.31 - 0.4 / 0.41 - 0.6 / 0.6 - 0.7 / 0.71 - 0.8 / 0.81 - 0.9 / 0.91 - > 1 (no depletion of Cer relative to La and Pr)
5. <i>equigranular (most grains of the same size) / porphyric bimodal (small and big crystals)/both</i>	Which C-isotope values expressed in permil (PDB) occur in the quarry?
Which is the Maximum Grain Size of the marble?	25. -1 - 0 / 0 - +1 / +1 - +2 / +2 - +3 / +3 - +4 / +4 - +5 / +5 - >+6
6. <i>very fine (0.2 - 1 mm) / fine (1 - 2 mm) / medium (2 - 3.8 mm) / medium to coarse (3.8 - 4.5 mm) / coarse (4.5 - 6 mm) / very coarse (6 - 10 mm)</i>	Which O-isotope values expressed in permil (PDB) occur ?
Which is the average grain size of the marble in the deposit?	26. +1 - 0 / 0 - -1 / -1 - -2 / -2 - -3 / -3 - -4 / -4 - -5 / -5 - -6 / -6 - -7 / -7 - -8 / -8 - -9 / -9 - -10 / -10 - -11 / -11 - -12 / -12 / -13 /
7. <i>very fine (0.15 - 0.33 mm) / fine (0.33 - 0.5 mm) / small (0.5 - 0.8 mm) / medium (0.8 - 1.5 mm) / coarse or homogeneous grain size distribution (1.5 - 2 mm)</i>	Did the marble quarry have good connections for easy transportation by ship or overland? Which were the marble supply conditions of the ancient site?
Which is the form of the marble grains?	27. <i>Good access to local quarries with same marble characteristics of the quarry and the ancient artefact / Good access to the seaside and easy transportation by ship (evtl. harbour) / The ancient rulers were rich and could get the marble from any place</i>
8. <i>elongated / same size in all directions</i>	In which area is the marble quarry situated? Which marble-producing regions should be considered as source for the artefact?
Do the marble grains show an orientation?	28. <i>Greece, mainland / Greece, Aegean islands / Asia Minor (North Turkey) / Asia Minor (South Turkey) / Italy / Alpine countries / Iberia / North Africa / Other regions</i>
9. <i>with orientation in a preferred direction / without orientation (statistically distributed)</i>	Which are the main production periods for the marble quarry district? /What is the presumed manufacture period of the artefact?
Which is the shape of the grain boundaries?	29. <i>older than 800 B.C. / 800-550 B.C. (Archaikum) / 550-336 B.C. (Classical period) / 336-30 B.C. (Hellenikum) / 29 B.C. - 330 AD (Roman Empire) / 330-1453 (Byzanz) / later (until today)</i>
10. <i>straight to curved / embayed - sutured</i>	Tabelle 38: Fragen und Optionen im Question Editor des Expertensystems (ohne „don't know“, Isotopie zusammengefasst)
Do the marble grains show signs of postmetamorphic stress like many and/or bent twinning lamellae?	
11. <i>many (broad and bent) twinning lamellae / few and thin twinning lamellae</i>	
Do the marble grains show signs of postmetamorphic stress like mylonisation?	
12. <i>signs of mylonitic texture (many broken, small grains) / no signs of mylonitic texture</i>	
Are there signs of higher iron values like a yellow patina?	
13. <i>yellow homogeneous patina / no yellow patina or only irregular spots</i>	
Does occur an odour when breaking or grinding marble pieces?	
14. <i>no odour / sometimes present / strong, like 'rotten eggs'</i>	
Does the marble consist mainly of calcite or dolomite	
15. <i>calcite / dolomite</i>	
Are the contents of accessory minerals relatively absent ('no'), low or high ('yes')?	
16. <i>quartz / mica / graphite / carbonaceous matter / pyrite / dolomite</i>	
Do chemical analysis exist?	
17. <i>yes / no /</i>	
How much Mg occurs?	
18. <i>0 - 0,3 wt% / 0,3 - 1 wt% / 1 - 2 wt% / 2 - 5 wt% / > 5 wt%</i>	
How much Fe occurs?	
19. <i>10-20 ppm / 20-50 ppm / 50-100 ppm / 100 -200 ppm / 200-300 ppm / 300 -500 ppm / > 500 ppm</i>	
How much Mn occurs?	

[MARMARA] Question 1=-5,10,5,-10,-10,-10,-10,10, Question 2=-5,10,-10,-10,-10,0,0,0, Question 3=10,-10,-10,-10,-10,5,-10,-10,0, Question 4=0,0,0,0,0,0,0, Question 5=-10,10,-10,10,0,0,0,0, Question 6=-10,5,10,-10,-10,-10,10,0,0, Question 7=-10,10,10,-5,-10,10,0,0,0, Question 8=-10,10,-10,10,10,0,0,0,0, Question 9=-10,10,10,0,0,0,0,0, Question 10=-10,10,10,0,0,0,0,0,0, Question 11=-10,-10,10,0,0,0,0,0,0, Question 12=5,5,10,0,0,0,0,0,0, Question 13=-10,10,10,0,0,0,0,0,0, Question 14=-10,-10,10,10,0,0,0,0,0, Question 15=-10,-10,10,5,0,0,0,0, Question 16=10,-5,-5,10,10,-5,10,0,0, Question 17=10,-10,-10,-10,-10,-10,-10,-10, Question 18=10,10,-5,-10,-10,10,-10,0,0, Question 19=10,10,10,-10,-10,-10,10,0, Question 20=10,-10,-10,-10,-10,-10,-10,10,0, Question 21=-10,-10,10,10,5,-10,-10,10,0, Question 22=10,-5,-10,-10,-10,-10,-10,10, Question 23=10,-5,-10,-10,-10,-10,-10,10,0, Question 24=10,10,0,-10,-10,-10,-10,10,0, Question 25=-10,-10,0,10,10,-10,-10,10,0, Question 26=-10,10,10,10,10,5,-10,10,10, Question 27=-10,10,10,10,10,5,-10,10,0, Question 28=-10,10,10,-10,-10,-10,-10,-10, Question 29=-10,-10,10,-10,-10,-10,-10,-10, Question 30=-10,-10,-10,10,10,10,0,0, RecordDescription=nodesc.htm
--

Tabelle 39: Numerische Verknüpfung der Merkmale (hier Record MARMARA) in der Knowledge Base

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhänge zwischen dem Naturwerkstein im Bauwerk/Artefakt und im Steinbruch bzw. Bruchgebiet (GERMANN & CRAMER in press)	12
Abbildung 2: Karte zur Ausdehnung des Herrschaftsgebietes des Pergamenischen Königreichs (nach RADT & STEINER 1988).....	14
Abbildung 3: Pergamonaltar im Berliner Pergamonmuseum.....	14
Abbildung 4: Überblick über die 1975-2000 von der Arbeitsgruppe GERMANN untersuchten Marmorlagerstätten (unterlegt) im östlichen Mittelmeerraum.....	15
Abbildung 5: Die tektonometamorphen Haupteinheiten der Orogengürtel von Helleniden und Anatoliden (GESSNER 2000)	17
Abbildung 6: Tektonische Karte der W-Türkei und Ägäis nach OKAY et al. (1996) aus KORALAY et al. (2001).....	18
Abbildung 7: Calcitstruktur in Spaltrhomboeder (aus MATTHES 1987).....	20
Abbildung 8: Calcit-Dolomit-Mischungslücke (aus ANOVITZ & ESSENE 1987).....	21
Abbildung 9: Rezente Bildung mariner Kalke im Great Barrier Reef (Foto Germann).....	22
Abbildung 10: Während der Alpenen Orogenese herausgehobene marine Riffkalksteine in den Dolomiten (Foto Germann).....	22
Abbildung 11: Diasporithalder in Marmorbruch bei Aphrodisias	25
Abbildung 12: Kathodolumineszenzmikrofazies klassischer Marmore. Im Original (SCHMID et al. 1999) zeigen die Schliffe A-E und K-L einen deutlich orangenen Farbton	39
Abbildung 13: In dieser Arbeit verwendete PDB-normierte C-O-Isotopenfelder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987) mit Messwerten untersuchter Marmorlagerstätten. Lediglich die ins Penteli-Feld fallenden thessalischen Marmore werden nicht weiter behandelt, da sie keinen Bezug zum Arbeitsgebiet aufwiesen. A: Aphrodisias, C: Carrara, D: Dokimeia, N: Naxos, PA: Paros, PE: Penteli, PR: Prokonnesos, T: Thasos, U: Uşak, zusätzlich BG: Bafa-See, Ef: Ephesos, Hym: Hymettos.....	44
Abbildung 14: C-O-Isotopenvariation in Kalksteinen nach ANDERSON & ARTHUR (1983). Das gestrichelte Rechteck umhüllt den Bereich antiker Marmore.....	47
Abbildung 15: Isotopendiagramm von Dolomiten und Calciten auf Tinos (MATTHEWS et al., 1999).....	48
Abbildung 16: Mit Probenmaterial belegte relevante Marmorlagerstätten und antike Orte im Ägäisraum. Helle Zahlen in Rechtecken symbolisieren heutige Straßenbezeichnungen	51
Abbildung 17: Karte antiker Orte und mit Probenmaterial belegter Marmorlagerstätten in der westlichen Menderesregion; nur Samos und Phourni wurden nicht aufgesucht.	51
Abbildung 18: Sprengwirkung von verrostenden Eisendübeln am Telephosfries.....	52
Abbildung 19: Wässerung von Marmorreliefplatte durch das Restauratorenteam Bertolin.....	53
Abbildung 20: Entnahme eines Bohrkerns am Telephosfries.....	53
Abbildung 21: Buntmarmore aus dem Katalog von MIELSCH (1985). Zuordnung von links nach rechts: Bardiglio (1. Spalte), Greco scritto (2. Spalte), Prokonnesos (3. Spalte), Thasos (4. Spalte oben), Hymettos	54
Abbildung 22: Typische parallele Bänderung in Marmoren von Marmara.....	54
Abbildung 23: Gebänderter Marmorblock auf Marmara.....	54
Abbildung 24: Bei Restaurierung am Telephosfries tritt dunkle Bänderung parallel zur Reliefoberfläche in Erscheinung.....	54
Abbildung 25: Bänderung in Marmor von Lasa	55
Abbildung 26: Feinkörnige dunkle, dolomitreiche Bänder in grobkörnigeren Marmoren von Herakleia	55
Abbildung 27 oben: eingescanntes Analogfoto (150dpi) eines Dünnschliffes des Artemistempels von Magnesia (ASMgAT3). Unten: Direkt digitalisierte Aufnahme des gleichen Dünnschliffes (300dpi); Bildgröße 21 bzw. 32 kB. Maßstabsbalken 2 mm	56

Abbildung 28: Digitalisierte Dünnschliffaufnahme (N+) in Farbe vor und nach Negativ- und Graustufenkonvertierung (Herakleia-Marmor Hk17), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	56
Abbildung 29: S&W-Bild von Burgass-Adasi-Marmor (BurgAd29_125) mit weißer Farbe der größeren Körner links und grauer Farbe der kleineren Körner rechts, N+, Maßstabsbalken 2 mm	57
Abbildung 30: Extrem starke Kornlängung an Marmoren des thessalischen Tembi-Tals (Ga29.2), N+, kurze Kante 2,4 mm.....	57
Abbildung 31: Dünnschliffaufnahmen von Marmoren mit verschiedenen Gefügeeigenschaften (Erklärung vorige Seite), Maßstabsbalken 2 mm, N+	59
Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung von Dolomit mit Normalverteilungskurve bei den hellen Marmoren, röntgendiffraktometrisch bestimmt.....	60
Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung von Calcit mit Normalverteilungskurve bei weißen und weißgrauen Marmoren, röntgendiffraktometrisch bestimmt	61
Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung von Quarz mit Normalverteilungskurve bei den hellen Marmoren, röntgendiffraktometrisch bestimmt.....	61
Abbildung 35: Korrelation zwischen aus röntgendiffraktometrisch ermittelten Dolomitgehalten und Magnesiumgehalten aus ICP-OES. Die größten Abweichungen von der Regressionsgeraden ergeben sich bei Marmoren mit sehr unregelmäßig verteilten Dolomitgehalten.....	62
Abbildung 36: Ausschnitt aus vorhergehender Abbildung zur Korrelation zwischen röntgendiffraktometrisch ermittelten Dolomit- und nassanalytisch ermittelten Magnesiumgehalten	62
Abbildung 37: Praktisch identische SEE-Gehalte von 2 Fragmenten aus den Milet-West-Brüchen.....	64
Abbildung 38: Verteilungsmuster der SEE in Marmoren von Marmara und dem Kozak bei Pergamon (Selgr); unnormiert (o.), C1-Chondrit-normiert (m.), PAAS-normiert (u.).....	67
Abbildung 39: Bei stark unterschiedlichen Gesamtgehalten weisen die PAAS-normierten SEE der Marmore von Euromos östlich des Bafa-Sees einen fast horizontalen Kurvenverlauf auf, die prokonnesischen Marmore des Großen Frieses (GF) hingegen große Schwankungen der SEE-Gehalte, eine ausgeprägte negative Cer-Anomalie, $\Sigma\text{SEE}/\text{Y}$ -Verhältnisse von 1 gegenüber 5 bei den Akkaya-Marmoren sowie eine deutliche Fraktionierungstendenz zugunsten der schweren SEE auf	69
Abbildung 40: Summe der SEE zu Yttrium aller Marmore.....	69
Abbildung 41: Fast identische SEE- Verteilungsmuster (1995 und 2001 gemessen) von Proben der Platte 5 des Telephosfrieses	70
Abbildung 42 a-q: Korrelationsdiagramme der SEE und Y über Mg, Fe, Mn, Sr, Ba, Pb, P, U und Zr. Mg und P in Gew%, alle anderen Angaben in ppm. Soweit nicht anders angegeben, wurden weiße bis graue Marmore aller Lagerstätten und Museumsobjekte ausgewertet	75
Abbildung 43: Isotopie untersuchter heller Marmore von Lagerstätten (ohne Prokonnesos). Selbst definierte Felder s. Kapitel 7.2. Im Hintergrund Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987) A: Aphrodisias, BG: Bafa-See, C: Carrara, D: Dokimeion-Afyon, Ef: Ephesos, Hym: Hymettos, N: Naxos, PA: Paros, PE: Pentelikon, PR: Prokonnesos-Marmara, T: Thasos, U: Uşak.	76
Abbildung 44: Isotopie der meisten antiken Objekte (ohne prokonnesische Marmore). Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende Abbildung 13	77
Abbildung 45: δO - und δC -Häufigkeitsdiagramme mit Normalverteilungskurve	78
Abbildung 46: Positive Korrelation von Kohlenstoff-isotopie und Sr (Paros-Lychnites).....	79
Abbildung 47: Negative Korrelation der Kohlenstoff-isotopie mit Fe/Sr mit geringerer Abweichung als nur bei Sr	79
Abbildung 48: Marmorproben mit Verarmung schwerer Isotope. Das PR-2-Feld entstand offensichtlich aus PR-1-Marmoren auf Marmara (Prokonnesos) infolge von Wechselwirkung mit an schweren O-Isotopen verarmten Lösungen, die aus Schiefer- und Lamprophyrbildungsprozessen herrührten (unterbrochene Pfeillinie)	79

Abbildung 49: Exemplarische Histogramme der unveränderten und lognormalisierten Messwerte von Dolomit und Cer. Eine Annäherung an die Normalverteilung kann erzwungen werden ...	83
Abbildung 50: Komponentendiagramm aus der Faktorenanalyse.....	85
Abbildung 51: Auswertung von ESR-Spektren (4 ESR-Variablen) und 4 morphologischen Variablen (MGS, COLOUR, ODOUR, STDCOL) untersuchter Marmore mittels Diskriminanzanalyse. Analyse und Diagramm von D. Attanasio (2002).....	86
Abbildung 52: Zuordnungsdiagramme der Marmorproben meist prokonnesischer Herkunft (blaue Kreuze oben) durch Y. Maniatis & K. Polikreti (2003). Der Y-Achsenabschnitt in der unteren Abbildung repräsentiert eine nicht näher erläuterte Diskriminanzfunktion.....	86
Abbildung 53: KL-Penteli.....	88
Abbildung 54: KL GF 97.....	88
Abbildung 55: KL GF 93a.....	88
Abbildung 56: KL-GF 93 b.....	88
Abbildung 57: KL GF 92.....	88
Abbildung 58: KL GF 11.....	88
Abbildung 59: KL GF 110.....	88
Abbildung 60: KL GF 111.....	88
Abbildung 61: KL GF 117.....	88
Abbildung 62: KL GF 118.....	89
Abbildung 63: KL GF 108.....	89
Abbildung 64: KL Ephesos Hafentherme.....	89
Abbildung 65: KL TF 1.....	89
Abbildung 66: KL TF 34.....	89
Abbildung 67: KL Akkaya 3.....	89
Abbildung 68: Aufnahmen von Kathodolumineszenzmikrofazies antiker Marmore, Erklärung s. S. 2; die oberen Aufnahmen sind die korrespondierenden Dickschliffaufnahmen in polarisiertem Licht bei gekreuzten Nicols, kurze Bildkante 2,9 mm.....	89
Abbildung 69: Auflichtaufnahme von prokonnesischem Marmor mit größtenteils in Magnetit (0,8 mm lang) umgewandeltem Eisensulfidkorn.....	90
Abbildung 70: Gaschromatographische Untersuchung volatiler Phasen nach Thermo-Extraktion. 1: CO, 2: Acetol, 3: 2-Ethyl-Hexanal, 4: 2-Ethyl-1-hexanol, 5: 1-Dodecen, 6: 1-Dodecanol.....	90
Abbildung 71: Mittelwerte, Interquartilsbereiche und Standardabweichungen des Fe/Sr-Verhältnisses von prokonnesischen und Paros-2-Marmoren. N gibt Anzahl der gemessenen Proben an, die meisten Paros-2-Werte wurden GERMANN (1988) entnommen.....	93
Abbildung 72 a-n: Mineral- und Elementgehalte sowie ausgewählte Elementverhältnisse verschiedener Lagerstättenmarmore. N: Anzahl der Meßproben, alle Angaben in ppm, außer bei Dolomit, Mg und Quarz (Gew%).....	95
Abbildung 73: Bivariates Fe-Sr-Diagramm prokonnesischer und Aphrodisias-Marmore.....	97
Abbildung 74: Fe-Mn von Marmoren aus Aphrodisias und der westlichen Menderes-Marmorsequenz.....	97
Abbildung 75: Dendrogramm aus Clusteranalyse mit 84 gültigen Fällen, oberer Prokonnesos-(Marmara)-Cluster nach rechts aufgesplittet.....	99
Abbildung 76: Streudiagramm von 12 Lagerstättenmarmoren aus der Diskriminanzanalyse.....	103
Abbildung 77: Maximum Grain Size – MGS (größter Korndurchmesser) der Lagerstättenmarmore.....	105
Abbildung 78: Maximum Grain Size – MGS (zweitgrößter Korndurchmesser) der Lagerstättenmarmore.....	105
Abbildung 79: Average Grain Size – AGS (mittlere Korndurchmesser) einschließlich Ausreißern und Extremwerten der Lagerstättenmarmore.....	105
Abbildung 80: Quotient aus MGS und durchschnittlicher Korngröße einschließlich Ausreißern und Extremwerten als möglicher Indikator für Heterogenität des Korngefüges.....	106

Abbildung 81: Quotient aus mittleren Korndurchmessern parallel zur längsten und kürzesten Kornerstreckung einschließlich Ausreißern und Extremwerten als Indikator für mögliche Kornlängung, Schichtung oder die Anwesenheit feinkörniger Bereiche im Dünnschliff	106
Abbildung 82: Isotopie der Marmorproben mit mehr als 3 Gew% Dolomit (XRD). Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), vgl. Abbildung 13	108
Abbildung 83: Dolomitgehalte (Gew%) mit Ausreißern und Extremwerten der untersuchten Marmore von Lagerstätten und antiken Objekten. Untere Abbildung Ausschnitt bis 10 Gew% Dolomit	108
Abbildung 84: Antike Nekropole bei Saraylar, Marmara, mit typischen Sarkophagen	110
Abbildung 85: Überrest antiken Abbaus mit Schrämspuren, Doğu Camlik bei Aksoy Kol. (3), Marmara	111
Abbildung 86: Freigelegte antike Säule am Rand modernen Marmorabbaus, Marmara.....	111
Abbildung 87: Hafen von Saraylar/Marmara mit Wellenbrechern aus Marmorblöcken. Im Hintergrund sind Spuren des Marmorabbaus erkennbar.....	111
Abbildung 88: Byzantinische Marmorstatue in einem Freilichtmuseum bei Saraylar/Marmara. Links im Bild Frau Asgari.....	111
Abbildung 89: Muster aus stark gebänderten Marmorplatten an der Fassade des St. Markusdom in Venedig.....	112
Abbildung 90: Prokonnesischer Marmor im Museum von Tekirdağ. Im Vordergrund V. Kästner, Archäologe der Berliner Antikensammlung	112
Abbildung 91: Gesägte Platten in lokalem Marmorbetrieb (Dincer-Werk) auf Marmara.....	113
Abbildung 92: Marmorabbaugebiete im NE-Teil Marmaras. Zahlen in Kreisen stellen Probenentnahmepunkte im März 2000 dar. Karte aus ASGARI & MATTHEWS (1995).....	114
Abbildung 93: Steinbruchwand von rezentem Abbau bei Mandira, im Block oben isoklinale Faltung	115
Abbildung 94: Steinbruchwand N von Salta Tepesi mit extremer dunkler Bänderung, Boudinage an Dolomitbändern und tektonischen Abschiebungen	115
Abbildung 95: Blick auf modernen Marmorsteinbruch westlich von Silinte, der sich entlang einer Ost-West verlaufenden Störung auf Marmara erstreckt	115
Abbildung 96: Halb herausgearbeitete byzantinische Riesensäule im Bereich rezenten Abbaus bei Harmantaş-Silinte, Marmara.....	115
Abbildung 97: Aus einem Block prokonnesischen Marmors gearbeitete Portalschwelle der Roten Halle von Pergamon.....	116
Abbildung 98: Dünnschliffaufnahme prokonnesischen Marmors (MmDC8), N+, kurze Kante 2,4 mm	116
Abbildung 99: Marmor von Doğu Camlik (o., MmDC7) und von Platte 92 des Pergamonaltars (u.). Der helle Saum rechts oben entstand nach Anfärbung mit Alizarin Rot, N+, Maßstabsbalken 2 mm	117
Abbildung 100: Die feinkörnigen Lagen korrespondieren mit einer schwach dunklen dolomitfreien Bänderung in einem hellweißen Marmor (Mermercik, MeMe1), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	117
Abbildung 101: Feinkörnige Bänderung mit über 50 Gew% Dolomit (o. Rem1_2) in einer hellen Marmorplatte (u. Rem1), N+, Maßstabsbalken 2 mm	117
Abbildung 102: Feinkörniger, hellweißer Dolomitmarmor (ohne Quarz, Glimmer, opake Min.) mit Calcitband ohne Deformationserscheinungen (Dincdo).....	118
Abbildung 103: Mustafa-Kemal-Paşa-Beyaz-Marmor mit größeren Calcitindividuen in feinkörnigerer Matrix, N+, Maßstabsbalken 2 mm	118
Abbildung 104: Fe/Mn-Korrelationsdiagramm prokonnesischer Marmore (Steinbrüche und antike Objekte) und von Marmoren aus dem Westlichen Marmortal von Paros (Werte aus Messungen von GERMANN et al. (1988). Letztere weisen i.d.R. höhere Mn- und Fe-Gehalte auf. Bei zahlreichen prokonnesischen Marmoren liegen die Mn-Gehalte unter der ICP-OES-Nachweisgrenze von 2,5 bzw. 5 ppm (je nach Verdünnung der Lösungen).	119

Abbildung 105: Bei relativ ähnlichen Gesamtgehalten weisen die PAAS-normierten SEE der Marmore von Akkaya (NB, nördlich von Bergama im Kozak) einen fast horizontalen Kurvenverlauf auf, die prokonnesischen Marmore des Großen Frieses (GF) und andere Marmara-Proben hingegen große Schwankungen der SEE-Gehalte, eine ausgeprägte negative Cer-Anomalie sowie Σ SEE/Y-Verhältnisse von 1 gegenüber 2,5-4,3 bei den Akkaya-Marmoren.....	119
Abbildung 106: Aus Originaldaten von HERZ (2003, persönl. Mitteil.) erstelltes Isotopendiagramm prokonnesischer Marmore.....	120
Abbildung 107: Isotopendiagramm prokonnesischer Marmore aus eigenen Daten (Marmara und Museumsproben) mit den Feldern PR-1 und PR-2.....	120
Abbildung 108: Kontaktbereich Granatamphibolitglimmerschiefer (links) / Marmor (rechts) in Dünnschliff (SilfaP1), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	121
Abbildung 109: Diskordanter Lamprophyrgang in Marmara-Marmor bei Mandira.....	121
Abbildung 110: Dünnschliff von obigem Lamprophyr (Man3Lamp), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	121
Abbildung 111: Einfluss von Klüften und Verkarstung auf abbaubare Blockgrößen, Silinte, Marmara.....	122
Abbildung 112: Moderner Marmorabbau in Dincer-Steinbruch im W-Teil von Marmara. Man beachte die Begrenzung der Abbaumöglichkeiten durch Auswirkungen der Karstbildung....	122
Abbildung 113: SEE in Marmor und angrenzendem Karstkalksinter; lediglich Cer ist signifikant verändert.....	122
Abbildung 114: Überreste des antiken Marmorabbaus von Thasos-Aliki.....	124
Abbildung 115: Trennwand aus Marmor zur Abgrenzung von Brüchen in Aliki.....	124
Abbildung 116: Liegegebliebene Säule im Bruch von Thasos-Aliki.....	124
Abbildung 117: Moderner Dolomitmarmorsteinbruch (Cape-Vathy-Typ) südlich von Limenas in N-Thasos.....	124
Abbildung 118: Überreste der Verhüttungsanlage von Limanes in Südthasos.....	124
Abbildung 119: Übergangszone Marmor/Schiefer bei Chrisiatou, Thasos.....	124
Abbildung 120: DS von Thasos-Aliki-Marmor, ARM30. Kurze Kante = 2,4 mm.....	125
Abbildung 121: Grobkörniger Marmor von Thasos-Aliki (o., ThaA13) und fein-mittelkörniger dolomitischer Marmor vom Cape-Vathy-Typ (u., ThaD3), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	125
Abbildung 122: Blick auf erstarrte Lavafront nördlich von Thermi.....	126
Abbildung 123: Granitsäule mit roten Feldspatkristallen und graue Marmorsäule mit hellen Fossilresten auf dem Kastro von Mytilene/Lesbos.....	126
Abbildung 124: Blick von Moria-Brüchen auf die Ostküste von Lesbos. Vorne rechts antike Säule.....	127
Abbildung 125: Zweite der gestaffelten Lesbos-Moria-Abbaugalerien.....	127
Abbildung 126: Grubenbau der Lesbos-Moria-Marmore.....	127
Abbildung 127: Manuell erzeugte Schrämmspuren an Lesbos-Moria-Abbauwand.....	128
Abbildung 128: Subparallel zur Schichtung verlaufende Fossilreste in Lesbos-Moria-Steinbruch.....	128
Abbildung 129: Grauer Marmor mit charakteristischen Megalodonten-Schalen, Lesbos Moria....	128
Abbildung 130: Graugesprenkelte Säule aus dem gleichen Bruch ohne markante Fossilien.....	128
Abbildung 131: Dünnschliffe von Moria-Marmoren mit wenigen (o. LbMo3) und vielen (u. LbMo4) Fossilresten, N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	128
Abbildung 132: Moria-Marmore im pergamenischen Rundmonument des Attalos I bei Athenatempel.....	129
Abbildung 133: SW-Dünnschliffaufnahme von grauem Marmor im Sockel des Zeusaltars (Kaegr_1), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	129
Abbildung 134: Thron des Potamon im Museum von Mytilene von vorne und von der Seite. Er besteht aus einem Marmor mit dem erkennbaren heteroblastischem Korngefüge und der charakteristischen parallelen Bänderung prokonnesischer Marmore. Fotos aus Museumsführer (ARCHONTIDOU & ACHEILARA 1999, S. 96).....	130

Abbildung 135: Römischer Aquädukt bei Moria aus grauem Marmor, Ziegeln und Glimmerschiefern.....	130
Abbildung 136: 3-D Darstellung des Latmischen Golfes vor ca. 4000 Jahren (BAY 2002).....	131
Abbildung 137: Delta-Verlandungsstufen A-F, ermittelt aus historischen Daten (BAY 2002).....	131
Abbildung 138: Geologie des westlichen Menderes-Gebietes und Entwicklung der Küstenlinie des Büyük Menderes Deltas (BRÜCKNER 1999)	132
Abbildung 139: Tektonische Karte der Ägäis und des Menderes-Massivs (OKAY 2001).....	132
Abbildung 140: Stark vereinfachter N-S-Schnitt durch das Menderes-Massiv (OKAY 2001)	133
Abbildung 141: In ihrer zeitlichen Einordnung nur noch bedingt zutreffende stratigraphische Position von Gesteinen des Menderes-Kristallins und von Paros (nach DÜRR 1976 links und PAPANIKOLAOU 1980 rechts)	133
Abbildung 142: Blick von Herakleia auf das Latmos-Gebirge; im Vordergrund antike Mauer aus Gneis	134
Abbildung 143: Geologische Karte des Menderes-Massivs (OKAY 2001).....	135
Abbildung 144: Antike Plätze und beprobte Marmorlagerstätten um den Bafa-See.....	136
Abbildung 145: Schrotgräben in den Milet-West-Brüchen	137
Abbildung 146: Kalkbrennofen in den Milet-West-Brüchen. Die Altreifen dienen als Brennmaterial zur Kalkgewinnung	138
Abbildung 147: Beschädigte Säule in den Milet-Ost-Brüchen.....	138
Abbildung 148: Dolomitische Strukturen im Calcitmarmor des Sofakapitells des Adyton im Apollontempel von Didyma und an Marmorblock des östlichen Bruchgebietes (in PESCHLOW-BINDOKAT 1981).....	138
Abbildung 149 oben: Dünnschliffaufnahme der mittel-grobkörnigen, homogenen Herakleia-Marmorvariante im Markttor von Milet. Darunter feinkörniger Marmor vom kleinen Gipfelbruch von Milet Ost (kurze Kante = 2,4 mm)	138
Abbildung 150: Dünnschliffaufnahmen von Marmoren aus Milet Ost, Milet West und Herakleia (oben nach unten), N+, Maßstabsbalken 2 mm	139
Abbildung 151: Sauerstoff-Kohlenstoff-Isotopie der Marmore von Brüchen am Bafa-See (BG mit Herakleia, Milet Ost und West), einfach gestricheltes BG-Feld nach (HERZ 1987). Darunter Isotopenfelder aus eigenen Messwerten von Lagerstätten und ihnen zugeordneten Museumsobjekten	140
Abbildung 152: Bei starker Überlappung zeigen die Milet-Marmore insgesamt niedrige bis mittlere Sr- und Fe-Gehalte, die Milas-Marmore niedrige Sr- und teilweise sehr hohe Fe-Gehalte	141
Abbildung 153: Während die Milas-Marmore im Mg/Sr-Diagramm nicht unterscheidbar sind, zeigen die Milet-Ost-Marmore tendenziell höhere Mg- (Dolomit) Gehalte.....	141
Abbildung 154: Bei insgesamt niedrigen Gehalten (bes. des Herakleia-Feldes) heben sich die Milet-Ost-Marmore tendenziell durch höhere Mn-, die Milet-West-Marmore durch höhere Fe-Gehalte ab	141
Abbildung 155: Bei meist niedrigen Gesamtgehalten zeigen die Herakleia-Marmore (einschließlich Milet Markttor und andere antike Objekte) La/Ce-Verhältnisse um 1 mit nur schwach ausgeprägtem Ce_{neg} , eine leichte Fraktionierungstendenz zugunsten schwerer SEE und höhere Y-Gehalte.....	141
Abbildung 156: Bei vielen Milet-Ost-Marmoren ist Ce_{neg} ausgeprägter als bei den Herakleia-Marmoren (zum Vergleich Mil-Ma).....	141
Abbildung 157: Die meisten Milet-West-Marmore sind ohne negative Ce-Anomalie bei niedrigeren Y-Gehalten und insgesamt abgeflachtem Kurvenverlauf. Die Verteilungsmuster der drei ähnlichen oberen Kahve-Adasi-Proben liegen zwischen denen der Milet-Ost- und Herakleia-Marmore (Mil-Ma).....	141
Abbildung 158: Römische Tempelanlage von Euromos	142
Abbildung 159: Liegende gebliebene Säule zwischen Tempel und Brüchen von Euromos. Dahinter M. Colak, Universität Izmir.....	142
Abbildung 160: Marmorfragmente am Tempel mit feinschichtiger Bänderung	142

Abbildung 161: Heterogenes Gefüge von Euromos-Marmoren (oben EuP6, u. Eu01), N+, Maßstabsbalken 2 mm	142
Abbildung 162: Geringe Deformationserscheinungen und buchtige Korngrenzen der Euromos-Marmore, N+, kurze Kante 4,8 mm	142
Abbildung 163: Isotopendiagramm von Marmoren von Euromos und Priene mit starker Überlappung.....	143
Abbildung 164: Euromos-Marmore mit i.d.R. höheren Fe- und Mn-Gehalten als die lithologisch ähnlichen Priene-Marmore.....	143
Abbildung 165: Bei insgesamt niedrigen Mg- (Dolomit) Gehalten weisen die Euromos-Marmore gegenüber Stratonikeia höhere Gehalte an Sr auf.....	143
Abbildung 166: SEE-Verteilungsmuster von Marmoren von Priene und Euromos. Letztere sind bei oft niedrigeren Absolutgehalten durch relativ höhere Cer- und niedrigere Y-Gehalte gekennzeichnet, die sich in einem geraden Kurvenzug ausdrücken.....	143
Abbildung 167: Σ SEE/Y von Marmoren von Prokonnesos, Euromos und dem Waffenrelief im Athenatempel von Pergamon.....	143
Abbildung 168: Kuppe von Marmor klippe am Bafasee gegenüber Burgass Adasi mit NS-EW verlaufendem Trennflächensystem	144
Abbildung 169: Calcitischer Marmor mit Graustreifung (o. BurgAd28) und weißer feinkörniger dolomitischer Marmor (u. BurgAd26) bei Burgass Adasi, N+, Maßstabsbalken 2 mm	144
Abbildung 170: Schwer zugängliche Lage Priesens über der Mäandertalebene auf dem Samsun Dağ	145
Abbildung 171: Athenatempel in Priene mit Säulen aus grauem Marmor.....	145
Abbildung 172: Antiker Steinbruch am Nordhang Priesens mit liegegebliebener Säulentrommel	145
Abbildung 173: Antiker Marmorbruch am NE-Hang von Priene.....	145
Abbildung 174: Breit streuendes Isotopenfeld der Marmorproben von Priene bei teilweiser Überlappung mit Burgass Adasi	146
Abbildung 175: Fe/Mn und Mg/Sr-Korrelations-diagramme von Marmoren aus Priene und dem antiken Steinbruch gegenüber der Insel Burgass Adasi am NW-Ufer des Bafa-Sees.....	146
Abbildung 176: Die Euromos-Marmore zeigen bei insgesamt hohen Fe-Sr-Gehalten eine positive Fe/Sr-Korrelation, die reineren Priene-Marmore hingegen eine negative.....	147
Abbildung 177: Dunkler Marmor mit Lagentextur und Kornlängung (Pri5), N+, Maßstabsbalken 2 mm	147
Abbildung 178: Weißer Marmor ohne Kornlängung und erkennbare reliktsche Schichtung (Pri1), N+, Maßstabsbalken 2 mm	147
Abbildung 179: Moderner Abbau auf roten Marmor vom Milas Bordo-Typ (bei Kalin Agil).....	148
Abbildung 180: Buntmarmore im Museum von Milas.....	148
Abbildung 181: Angeschliffene Platten von Milas-Bordo-Marmor, rechts mit Calcitkluftfüllung	148
Abbildung 182: Moderne Milas-Marmorplatten mit hohem Anteil akzessorischer Mineralien (in Bergama –Pergamon aufgenommen).....	149
Abbildung 183: Typischer feinkörniger Marmor aus antiken Steinbrüchen von Milas (G-Mi1 und P8), N+, Maßstabsbalken oben 2 mm, unten 10 mm.....	149
Abbildung 184: Etwas grobkörnigere (MGS 2,4 mm) Variante von Milas-Marmoren (P10-108), N+, Maßstabsbalken 2 mm	149
Abbildung 185: Extrem heterogener Marmor mit großen Calcitkristallen (MGS 6 mm) von N-Bruch Milas (P9), N+, Maßstabsbalken 10 mm	149
Abbildung 186: Isotopie der Marmore von Milas und Stratonikeia.....	150
Abbildung 187: Milas-Marmore mit teilweise hohen Fe- und im Vergleich zu Stratonikeia niedrigen Mn-Gehalten	150
Abbildung 188: Gegenüber den Miletsteinbrüchen am Bafa-See zeigen die Milas-Marmore teilweise erheblich höhere Fe- bei gleichermaßen niedrigen Mn-Gehalten	150
Abbildung 189: Ähnliches SEE-Verteilungsmuster mit nur geringer Cer-Verarmung bei Milas-Marmoren.....	150

Abbildung 190: Stratonikeia-Stadt	150
Abbildung 191: Wandinschrift (Edikt des Diokletian) am Marktplatz von Stratonikeia	151
Abbildung 192: Antiker Bruch bei Stratonikeia; oben mit erhaltenem Schrotgraben.....	151
Abbildung 193: Niedrigere Fe- und Sr- Gehalte der Marmore von Stratonikeia gegenüber Euromos	152
Abbildung 194: Die SEE-Verteilungsmuster der "Stratonikeia"-Marmore weisen bei mäßigem $Ce_{T_{neg}}$ eine auffällige Fraktionierung zuungunsten der schweren SEE auf. Der Kurvenverlauf der Euromosproben ist demgegenüber flacher.....	153
Abbildung 195: Isotopie der Marmore von Stratonikeia und Euromos.....	153
Abbildung 196: Muğla Beyaz-Marmor, N+, Maßstabsbalken 2 mm	154
Abbildung 197: Blick auf das römische Theater im antiken Aphrodisias	154
Abbildung 198: Säulen aus hellen und dunklen (untere Fragmente) Marmoren in Aphrodisias	154
Abbildung 199: Moderner Marmorabbau zwischen Aphrodisias und den antiken Brüchen. Erkennbar ist die Begrenzung des gewinnbaren Volumens durch Dolomiteinschaltungen	155
Abbildung 200: Abschlaghalden vor antiker Bruchgalerie von Aphrodisias	155
Abbildung 201: Weißer, mittel- bis grobkörniger Aphrodisias-Marmor mit heterogenem Korngefüge (Afr4), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	156
Abbildung 202: Weißer Aphrodisias-Marmor mit homogenem bis heterogenem Korngefüge und 2 unterschiedlichen Bereichen, die sich im Handstück nicht bemerkbar machen (Afr5), N+, Maßstabsbalken 2 mm	156
Abbildung 203: Mittelkörniger weißer Aphrodisias-Marmor mit homogenerem Korngefüge (Afr10), N+, Maßstabsbalken 2 mm	156
Abbildung 204: Feinkörniger weißgrauer Aphrodisias-Marmor mit nur wenigen Calcitkristallen bis 3 mm MGS (Afr3aCcwgr), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	156
Abbildung 205: Die meisten Isotopiemesswerte liegen in den klassischen Aphrodisias-Feldern... 157	157
Abbildung 206: Bei niedrigen Fe-Gehalten aphrodisischer und prokonnesischer Marmore unterscheiden sich letztere durch höhere Sr-Gehalte.....	157
Abbildung 207: Unregelmäßiges SEE-Verteilungsmuster der Aphrodisiasmarmore mit gelegentlichen Ce- und Y-Peaks bei insgesamt flachem Kurvenverlauf und niedrigen Gehalten	157
Abbildung 208: „Afyon Sardikli“, N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	158
Abbildung 209: „Afyon White“, N+, Maßstabsbalken 2 mm	158
Abbildung 210: Stratigraphisches Profil des Mesozoikums in der Nähe von Milas(l.) und bei Selçuk (GÜNGÖR & ERDOGAN 2002).....	159
Abbildung 211: Geologische Karte und Schnitt nordöstlich von Selçuk (GÜNGÖR & ERDOGAN 2002)	160
Abbildung 212: Blick auf Theater über die „Marmorstraße“ zum ehemaligen Hafen von Ephesos	161
Abbildung 213: Blick von Hafen über die "Marmorstraße" zum Theater	161
Abbildung 214: Verwendung anstehenden Gesteins im antiken Ephesos.....	161
Abbildung 215: Untertägiger Steinbruch von Kuşini	163
Abbildung 216: Stützpfeiler im Untertageabbau von Kuşini.....	163
Abbildung 217: Sarkophagrohling in Brüchen von Ephesos Aytekin.....	163
Abbildung 218: Dünnschliffe von Ephesos-Marmoren: a) Aytekin dk mit opaken schwarzen Einschlüssen, b) Aytekin hell mit Dolomitblasten, c) Kursak, d) Kuşini (rechte Hälfte angefärbt), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	164
Abbildung 219: Isotopie ephesischer Marmore nach Daten von HERZ (pers. Mitteil. 2003).....	164
Abbildung 220: Isotopie von Marmoren aus Ephesos und vom Dionysostempel in Pergamon.....	164
Abbildung 221: SEE-Verteilungsmuster von ephesischen Marmoren und Kalksteinen, Paros Lychnites und dem Dionysostempel von Pergamon.....	165
Abbildung 222: Phourni-Marmor im Heraion von Samos mit feinkörnigen Dolomitbändern (Heka4), N+, Maßstabsbalken 2 mm	167

Abbildung 223: Karte der Inseln vor der Mäandermündung: Samos, Ikaria, Agathonisi, Phourni.	168
Abbildung 224: Stratigraphische Position der Marmore von Paros und Naxos (nach PAPANIKOLAOU 1980 und BONNEAU et al. 1978).....	170
Abbildung 225: Antike Marmorbrüche auf Paros (GERMANN & KNOLL 1987).....	170
Abbildung 226: Bearbeitungsspuren an untertägigem Lychnites-Marmorabbau (GERMANN & KNOLL 1987).....	171
Abbildung 227: Antike Brüche von Paros II (GERMANN & KNOLL 1987).....	172
Abbildung 228: Paros Lychnites (PaLy22,5), N+, Maßstabsbalken 2 mm	172
Abbildung 229: Paros W-Marmortal (P23,4)	172
Abbildung 230: Prokonnesischer Marmor (GF110-7), N+, Maßstabsbalken 2 mm	172
Abbildung 231: Feinkörniger Siphnos-Marmor (PaSiph215), N+, Maßstabsbalken 2 mm	172
Abbildung 232: Grobkörnig-heteroblastischer Marmor von Naxos Flerio, Kouros (21_13), N+, Maßstabsbalken 2 mm	173
Abbildung 233: Korngrößen (AGS) und Formfaktoren parischer und naxischer Marmore (GERMANN & KNOLL 1987). Die antiken Objekte unten wiesen ein parisches Muster auf ...	173
Abbildung 234: SEE parischer Marmore mit sehr niedrigen Gehalten der Lychnites	173
Abbildung 235: Isotopie parischer und naxischer Marmore. Die drei als „Paros“ bezeichneten Werte im PA-1-Feld entsprechen Lychnites bzw. einer Probe vom östlichen Marmortal. Die δC -Werte >3 der Naxos-Marmore stammen von Proben aus Sangri (Werte meist von GERMANN et al. 1988)	174
Abbildung 236: Fe/Mn parischer und naxischer Marmore (Ausschnitt, Werte meist GERMANN et al., 1988)	175
Abbildung 237: Feinkörniger pentelischer Marmor vom Tiberufer (R1), N+, Maßstabsbalken 2 mm	177
Abbildung 238: Etwas grobkörnigere Variante pentelischen Marmors (Hp-Lnd), N+, Maßstabsbalken 2 mm	177
Abbildung 239: SEE von Marmoren aus Wunsiedel und der Ergänzung am Pergamonaltar mit höheren Ce- und niedrigeren Y-Gehalten sowie von Marmara	179
Abbildung 240: Isotopendiagramm antiker Objekte aus der Mäandertalregion (Erläuterung im Text) mit Feldern nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende s. Abbildung 13	183
Abbildung 241: Isotopendiagramm von Marmorlagerstätten der Mäandertalregion mit Feldern nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende s. Abbildung 13	184
Abbildung 242: Isotopie antiker Objekte aus der Mäandertalregion mit aus Daten von Marmorlagerstätten und ihnen zugeordneten antiken Objekten konstruierten Isotopenfeldern, Lagerstättenlegende Abbildung 244	184
Abbildung 243: Isotopie von Marmorlagerstättenproben besonders aus der Mäandertalregion mit aus Daten von Lagerstätten und ihnen zugeordneten antiken Objekten erstellten Isotopenfeldern, Lagerstättenlegende s. Abbildung 244.....	185
Abbildung 244: Aus Messwerten von Marmorlagerstätten und ihnen zugeordneten antiken Objekten vorwiegend der Mäandertalregion erstellte Isotopenfelder ohne Datenpunkte. Felder soweit nicht selbsterklärend: BuA: Burgass Adasi, Strat: Stratonikeia, Hk: Herakleia, MTO und MTW: Milet-Ost- und Westbrüche am Bafasee, My28: Marmorausbiß bei Myus, Efl: Ephesos; klassische griechische Lagerstätten sind Hym: Hymettos und Tha2-Al: Thasos Aliki	185
Abbildung 245: Isotopie antiker Objekte und Lagerstättenzuordnung aus Pergamon ohne prokonnesische Marmore des Pergamonaltars (Dionysostempel [Ephesos], Marmorsaal [Hymettos], Tempel R am Oberen Gymnasion [Thasos Aliki wie auch Frontsäule des Dodekastylus in Didyma], Athenahalle Waffenrelief und grauer Marmor KaeGr vom Pergamonaltar [Lesbos?], Demetertempel, Kouros, Markttempel [Marmara], Restaurationsergänzungen am Großen Fries GF109E [Carrara] und GF111E [Wunsiedel]),	

Athen Eumeneshalle, Ephesos Hafentherme und Troja Athenatempel [alle Marmara]. Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987), Lagerstättenlegende s. Abbildung 13	187
Abbildung 246: Isotopie antiker Objekte und Steinbruchproben prokonnesischer Provenienz mit erweitertem klassischem Isotopenfeld PR und dem neuen Feld PR-2, eingetragen in Felder nach MOENS et al. (1992) und HERZ (1987). Lagerstättenlegende s. Abbildung 13. Man beachte die notwendige Erweiterung von δO bis -13.....	187
Abbildung 247: Gebänderter Marmor am römischen Theater von Milet, evtl. Marmara	189
Abbildung 248: Löwe im Museum von Milet mit dunkler Bänderung, evtl. aus prokonnesischem Marmor.....	189
Abbildung 249: Stadtplan des antiken Milets (BRÜCKNER 1999)	189
Abbildung 250: In neogene Kalksteinhorizonte eingegrabene Nekropole bei Balat von außen und innen.....	190
Abbildung 251: Markttor von Milet im Pergamonmuseum (oben) und Bohrkerne seiner Säulen im Kellerarchiv der Antikensammlung.....	190
Abbildung 252: Bildtafel mit Dünnschliffen von Marmoren des Markttores von Milet und den Herakleiabrüchen N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	192
Abbildung 253: Delphinion Kyma, paralleler und senkrechter Schnitt, N+, Maßstabsbalken 2 mm	194
Abbildung 254: Delphinion Platte, N+, Maßstab 2mm	194
Abbildung 255: Delphinion Volute, N+, Maßstabsbalken 2 mm	194
Abbildung 256: Dünnschliff eines Marmorvorkommens bei Myus (MyLS28), N+, Maßstabsbalken 2 mm	194
Abbildung 257: DS einer Probe von Priene (Pri4), N+, Maßstabsbalken 2 mm	194
Abbildung 258: Isotopie von Wagenrennenfries, Mantelträger, Gelagertem aus Myus, Delphinion aus Milet und Geländeproben bei Myus (MyLS28 und andere).....	195
Abbildung 259: Mg/Sr von Marmoren aus Milet und Myus	195
Abbildung 260: Fe/Mn von Marmoren aus Myus und Milet.....	195
Abbildung 261: SEE-Verteilungsmuster mit deutlichen Unterschieden: Delphinion von Milet, Mantelträger und Wagenrennenrennenfries aus Myus stimmen gut mit der Lagerstätte MyLS28 überein; die niedrigeren Werte der antiken Objekte von Milet mit Herakleia.....	195
Abbildung 262: DS-Aufnahme des Rankenpfeilers vom Nymphäum in Milet mit großem Calcitkristall, N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	196
Abbildung 263: Dünnschliffaufnahme des Schildakroters am Rathaus von Milet, N+, Maßstabsbalken 2 mm	196
Abbildung 264: Dünnschliff Dionysos und Satyr von Faustinathermen Milet, N+, Maßstabsbalken 2 mm	197
Abbildung 265: Das antike Myus während der Ausgrabungen. Im Hintergrund der Mäander.....	197
Abbildung 266: Seiten- und Vorderansicht des Mantelträgers von Myus im Pergamonmuseum... 198	198
Abbildung 267: Gelagerter von Myus im Pergamonmuseum	198
Abbildung 268: Mg-Sr-Korrelationen pentelischer Marmorproben und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon.....	199
Abbildung 269: Mn-Fe-Korrelationen pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon	199
Abbildung 270: SEE-Verteilungsmuster pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus mit schwächer ausgeprägtem Ce_{neg} sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon	199
Abbildung 271: $\Sigma SEE/Y$ -Korrelationen pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore	199
Abbildung 272: Isotopendiagramm pentelischer Marmore und des Gelagerten von Myus sowie hymettischer Marmore einschließlich des Waffenreliefs von Pergamon	199
Abbildung 273: Wagenrennenfries aus Myus. In der Mitte Ergänzung.	200

Abbildung 274: Dünnschliff eines Marmorvorkommens bei Myus (MyLS28), N+, Maßstabsbalken 2 mm	200
Abbildung 275: Dünnschliffaufnahmen des Wagenrennenfrieses (o.) und des Kapitells (u.), N+, Maßstabsbalken 2 mm	200
Abbildung 276: Säule an N-Seite des Didymaion mit deutlichen dolomitischen Relikten	201
Abbildung 277: Frauenkopf einer Columna Caelata im Berliner Museum	201
Abbildung 278: Columna Caelata mit stark gelängten Calcitkristallen, N+, Maßstabsbalken 2 mm	201
Abbildung 279: S&W-Aufnahme von Dünnschliff des archaischen Kapitells von Didyma mit Dolomitlagen in Marmor von Milet West, N+, Maßstabsbalken 2 mm	202
Abbildung 280: S&W-Aufnahme von Dünnschliff des archaischen Kapitells von Didyma ohne erkennbare Dolomitlagen, N+, Maßstabsbalken 2 mm	202
Abbildung 281: S&W-Aufnahme von Dünnschliff des archaischen Kouros von Didyma mit großen gelängten Calcitkristallen, N+, Maßstabsbalken 2 mm	202
Abbildung 282: Grobkörniger thasischer Marmor der Frontsäule des Dodekastylos, N+, Maßstabsbalken 2 mm	203
Abbildung 283: Naiskos von Didyma im Berliner Museum	203
Abbildung 284: Fein-mittelkörniger Marmor des Naiskos, N+, Maßstabsbalken 2 mm	203
Abbildung 285: Feinkörniger Marmor von Fragment aus dem Steingarten, N+, Maßstabsbalken 2 mm	204
Abbildung 286: Das antike Magnesia	204
Abbildung 287: Aufgestellte Teile des Artemistempels von Magnesia im Pergamonmuseum	204
Abbildung 288: Beprobte Simaecke des Magnesia-Artemistempels im Archiv des Pergamonmuseums	204
Abbildung 289: Magnesia, Säulenkapitellvolute mit gelblichem Rand im Archiv des Pergamonmuseums	205
Abbildung 290: Beprobte Magnesia-Altarplatte des Artemistempels im Archiv des Pergamonmuseum	205
Abbildung 291: Isotopie von Marmoren des Artemistempels von Magnesia, Magnesia Lagerstätten und Ephesos Kursak	206
Abbildung 292: SEE der Magnesia-relevanten Marmore. Architekturteile, MgLS und Ephesos-Kursak weisen ähnliche Verteilungsmuster auf, anders die anstehende Marmorsteinbruchprobe. Die Altarprobenwerte ohne negative Cer-Anomalie entsprechen besonders denen der Milet-West-Marmore (vgl. Abbildung 157)	206
Abbildung 293: Fe/Mn der Magnesia-relevanten Marmore	207
Abbildung 294: Mg/Sr der Magnesia-relevanten Marmore	207
Abbildung 295: Magnesia Sima-2, hell grobkörnig	208
Abbildung 296: Ephesos Kursak, hell, grobkörnig	208
Abbildung 297: grobkörniger weißer Marmor aus modernem Abbau bei Magnesia, N+, Maßstabsbalken 2 mm	208
Abbildung 298: Dünnschliffaufnahmen von Architekturteilen (a-d) und Altar (g) des Artemistempels in Magnesia sowie von der 20 km nördlich gelegenen Lagerstätte MgLS (e-f), N+, Maßstabsbalken 2 mm	209
Abbildung 299: Antiker Marmorsteinbruch bei Magnesia. Oben Ch. Kronewirth, von dem das Probenmaterial und die Fotos stammen. Unten: durch Dolomit hervorgerufene feine subhorizontale Lagen	210
Abbildung 300: Blick von der Akropolis nach Norden auf Selinustal und Kozak. Links im Bild vulkanische Kuppe	213
Abbildung 301: Ausschnitt aus geologischer Karte von Pergamon und dem Kozak (MADEN TEKTIK VE ARAMA 1964)	213
Abbildung 302: Marmorkiesel im Flussgeröll des Selinus	214
Abbildung 303: Granodioritboulder bei Kozak	215

Abbildung 304: Abtransport von Granodioritblöcken	215
Abbildung 305: Weiterverarbeitung von Granodioriten für den Straßenbau	215
Abbildung 306: Granodioritsche Säulen auf der Akropolis von Pergamon (oben mit dunklen Nestern) und dem Kastro von Mytilene (unten links).....	215
Abbildung 307: Hang mit ehemaligem Marmorabbau bei Kirkayalar Eski Maden – Kozak.....	217
Abbildung 308: Feinkörniger Marmor mit starker Zerklüftung von Kirkayalar Eski Maden.....	217
Abbildung 309: Grobkörnigerer Akkaya-Marmor mit homogenerem Korngefüge als prokonnesische Marmore (Ak3), N+, Maßstabsbalken 2 mm.....	217
Abbildung 310: C/O-Isotopie der Marmore vom Kozak. Alle Werte liegen außerhalb des Bereiches der meisten in der Antike verwendeten Marmore.....	218
Abbildung 311: SEE-Verteilungsmuster der Marmore vom Kozak. Anders als die feinkörnigen Marmore von Eski Maden weisen die Akkaya-Marmore keine negative Cer-Anomalie und niedrige Y-Gehalte auf.....	218
Abbildung 312: Marmorleiste in Andesitmauer	219
Abbildung 313: Herkunftsgebiete von in Pergamon verwendeten Marmoren: Marmara, Thasos, Lesbos, Hymettos; Paros-Lychnites kann unterdessen zugunsten von Ephesos ausgeschlossen werden, Naxos ist fraglich	219
Abbildung 314: Blick auf Athenaheiligtum mit doppelter Säulenreihe vorne und Rundmonument Bildmitte links.....	220
Abbildung 315: Übersichtsplan der wichtigsten Ausgrabungen in Pergamon (aus RADT 1999)....	221
Abbildung 316: Detail des Athenaheiligtums mit streifigen Marmoren.....	221
Abbildung 317: Rundmonument am Athenatempel aus dunklem Marmor mit hellen Megalodonten von Lesbos Moria	221
Abbildung 318: In andesitische Außenwand integrierte streifiger Marmorträger und Säule.....	222
Abbildung 319: Fundamente des Zeusaltar nach Ausgrabung (KUNZE 1992) und heute.....	223
Abbildung 320: Nordfries des Pergamonaltars während der Restaurierung.....	223
Abbildung 321: Eine der wenigen Platten(48) des Telephosfrieses mit in der Draufsicht sichtbarer Bänderung des Marmors	224
Abbildung 322: Dünnschliffe von Marmor des Telephosfrieses TF8 (l) und von Marmara Silinte (r), kurze Kante 2,4 mm.....	224
Abbildung 323: Etwas grobkörniger Marmor (B1 von Platte 1) mit $\delta O -11,7$, N+, Maßstabsbalken 2 mm	225
Abbildung 324: Etwas feinkörniger Marmor (Platte 16) mit "normalem" δO von $-0,9$, N+, Maßstabsbalken 2 mm	225
Abbildung 325: Moderne Ergänzung aus Kalkstein; GF 117_K1, N+, Maßstabsbalken 2 mm	225
Abbildung 326: Zementergänzung an Platte 39, N+, Maßstabsbalken 2 mm	225
Abbildung 327: Prokonnesischer Marmor von Platte 109, N+, Maßstabsbalken 2 mm	226
Abbildung 328: Moderne Ergänzung aus Carrara-Marmor an Platte 109E, N+, Maßstabsbalken 2 mm	226
Abbildung 329: Moderne Ergänzung der Platte 111 (wahrscheinlich Wunsiedel-Marmor).....	226
Abbildung 330: Wunsiedel-Marmor, N+, Maßstabsbalken 2 mm	226
Abbildung 331: SEE-Verteilungsmuster von Marmoren aus Wunsiedel, der modernen Ergänzung GF111E und prokonnesischer Marmore des Pergamonaltars.....	227
Abbildung 332: Moderne Ergänzung aus wiederverwertetem prokonnesischem Marmor (GF106E), N+, Maßstabsbalken 2 mm	227
Abbildung 333: Demeterfries im Museum in Bergama (o.) und beprobtes Friesfragment der Berliner Antikensammlung (u.)	228
Abbildung 334: Friesfragment des Demetertempels aus Marmara-Marmor, N+, Maßstabsbalken 2 mm	228
Abbildung 335: Prokonnesischer Marmor im Tempel am Oberen Markt, N+, Maßstabsbalken 2 mm	228
Abbildung 336: Kouros aus Pergamon im Archiv der Antikensammlung.....	229

Abbildung 337: Marmor des Waffenreliefs der Athenahallen, N+, Maßstabsbalken 2 mm	229
Abbildung 338: Isotopie des Waffenreliefs und eines vermutlich aus Lesbos stammenden dunkelgrauen Marmors vom Sockel des Telephosfrieses, Lesbos-Feld näherungsweise nach LAZZARINI et al. (1999).....	230
Abbildung 339: Gebälkfries des Dionysostempels (oben) und des Altars (unten) in der Antikensammlung	231
Abbildung 340: DS-Aufnahme von Fries des Dionysostempels (oben), darunter von Marmor aus Ephesos Aytekin. Unterste Abbildung parischer Lychnites (PaLyTUM38), N+, Maßstabsbalken 2 mm	231
Abbildung 341: Isotopie von Marmoren aus Ephesos und vom Dionysostempel in Pergamon sowie Felder des Artemisions in Ephesos (oberes Feld Artemision 2 aus Aytekin-Marmor nach Poster von MUSS et al. (2003) auf ASMOSIA 7, 2003)	232
Abbildung 342: PAAS-normiertes SEE-Verteilungs-muster von Marmoren des Dionysostempels, aus Ephesos und parischen Lychnites.....	233
Abbildung 343: Feinkörniger Marmor aus Hymettos vom Waffenrelief des Marmorsaals, N+, Maßstabsbalken 2 mm	233
Abbildung 344: Isotopie feinkörniger Marmore des Waffenreliefs im Marmorsaal sowie von Lagerstätten und ihnen zugeordneten Objekten aus Marmoren von Carrara, Hymettos, Milas Penteli und Phourni.....	234
Abbildung 345: Grobkörniger Marmor des Tempel R auf der Akropolis von Pergamon.....	235
Abbildung 346: Grobkörniger Marmor vom Tempel R, N+, Maßstabsbalken 2 mm	235
Abbildung 347: Marmor aus den Brüchen von Thasos-Aliki, N+, Maßstabsbalken 2 mm	235
Abbildung 348: Sehr ähnliche SEE-Verteilungsmuster von Marmoren aus Thasos, nur die dolomitische Probe weicht ab	235
Abbildung 349: Isotopie der grobkörnigen Marmore aus Thasos-Aliki und von Naxos	235
Abbildung 350: Heliosmetope des Athenatempels von Troja im Pergamonmuseum	236
Abbildung 351: Prokonnesischer Marmor vom Athenatempel von Troja, N+, Maßstabsbalken 2 mm	236
Abbildung 352: Prokonnesischer Marmor für Hafentherme von Ephesos, N+, Maßstabsbalken 2 mm	237
Abbildung 353: Wahrscheinlich Marmara-Marmor der Eumenes Halle in Athen, N+, Maßstabsbalken 2 mm	238
Abbildung 354: Dunkle Bänderung (oben) in Marmor der Eumenes Halle (lange Kante 9 cm)	238
Abbildung 355: Sr zu Fe prokonnesischer Marmore. Eumeneshalle und Hafenthermen Ephesos weisen etwas erhöhte Fe-Gehalte auf.....	238
Abbildung 356: Summe der SEE über Y prokonnesischer Marmore. Ähnlich wie einige SEE-reiche Marmore des Telephosfrieses weisen Eumeneshalle und Hafenthermen von Ephesos Σ SEE/Y-Verhältnisse > 1 auf	238
Abbildung 357: Teile des Athenatempels von Priene im Pergamonmuseum.....	239
Abbildung 358: Fragment der Antenbasis mit charakteristischen dünnen Dolomitlagen	239
Abbildung 359: Phourni-Marmor im Athenatempel von Priene, N+, Maßstabsbalken 2 mm	240
Abbildung 360: Phourni-Marmor im Heraion von Samos, N+, Maßstabsbalken 2 mm	240
Abbildung 361: Fragment des Athenatempels aus lokalem Priene-Marmor (Dünnschliff GERMANN 1981), N+, Maßstabsbalken 2 mm	240
Abbildung 362: Lokaler weißer Marmor von Priene, N+, Maßstabsbalken 2 mm	240
Abbildung 363: Isotopie der Marmore von Priene, des Athenatempels und des Heraions von Samos	240
Abbildung 364: SEE der Marmore von Priene, des Athenatempels und des Heraions von Samos	240
Abbildung 365: Fe-Sr der Marmore von Priene, des Athenatempels und des Heraions von Samos	240
Abbildung 366: Fragment des Heraions von Samos.....	241

Abbildung 367: Flußdiagramm zum Zusammenhang geogener Einflußgrößen auf Marmoreigenschaften und Nutzung in der Antike.....	244
Abbildung 368: Screenplot der Ergebnisse des UI und Ausschnitt aus der Erklärung für den Datensatz Marmara einer Probe des Telephosfrieses	245
Abbildung 369: Eingaben zu Farbe, Mustern und Isotopie der Telephosfries-Marmorprobe im UI	246
Abbildung 370: Zuordnung der Athenatempelprobe zu Phourni nach Eingabe weniger äußerer Merkmale	246
Abbildung 371: Mögliche Antwort auf Frage 30 nach dem Herstellungszeitraum des Artefakts im UI	246
Abbildung 372: Deutlichere Zuordnung zu Phourni nach Durchlaufen der gesamten Fragensequenz	247
Abbildung 373: Abbauzeitraum von Carrara-Marmoren in der KA.....	247
Abbildung 374: Screenplot des QE mit aktivierter Abhängigkeit	247

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ionenradien und Endglieder wichtiger karbonatbildender Kationen.....	20
Tabelle 2: Technische Kennwerte von Marmoren (DIN 52105 + http://www.geodienst.de/marmor.htm)	24
Tabelle 3: Allgemeine Voraussetzungen für die Feststellung von Merkmalen zur Herkunftsbestimmung von antiken Marmoren (GERMANN & CRAMER in press)	30
Tabelle 4: Potenziell einsetzbare Merkmale für die Herkunftsbestimmung, erforderliche Probenart und –mengen sowie Selektivität (1 sehr geringe, 5 sehr hohe Aussagekraft).....	31
Tabelle 5: Geowissenschaftlich begründete Merkmalskombination für die Marmor- Herkunftsbestimmung	31
Tabelle 6: Äußere Merkmale von Marmoren (kursiv: das Beispiel Marmara).....	32
Tabelle 7: INAA-Messwerte für Marmore von Carrara und Marmara nach MOENS et al. (1988b) und MELLO et al. (1988b).....	41
Tabelle 8: Untersuchte Lagerstätten und antike Stätten mit verwendeten Werksteinen und Merkmalen	50
Tabelle 9: Anzahl der Proben und Art der Messungen an antiken Objekten und Lagerstätten.....	52
Tabelle 10: Messwerte AAS und ICP-OES	65
Tabelle 11: Gehalte verschiedener für die Normierung der SEE eingesetzter Standards (Zusammenstellung von P. Dulski). Erläuterung der Abkürzungen im Text	66
Tabelle 12: Korrelationen zwischen Σ SEE und Elementen bzw. den Mineralphasen Quarz, Calcit und Dolomit	71
Tabelle 13: Isotopiewerte gleicher in 1995 und 2001 gemessener Telephosfriesplatten	76
Tabelle 14: Nach SPEARMAN (1908) ermittelte nichtparametrische Korrelationskoeffizienten KRK	82
Tabelle 15: Nach PEARSON (1966) ermittelte metrische Korrelationen.....	82
Tabelle 16: Korrelation nach PEARSON (1966) zwischen logtransformierten Messwerten	83
Tabelle 17: Rotierte Komponentenmatrix aus der Faktorenanalyse (SPSS)	84
Tabelle 18: Nur geringe Veränderung der Faktorenladung bei Einfügung abgeleiteter Elementverhältnisse	85
Tabelle 19: Probenzuordnung mittel KL (Ramseyer & Decrouez 2003) und EPR (Attanasio 2002 und Maniatis & Polikreti 2003)	87
Tabelle 20: Statistische Parameter geochemisch-mineralogischer Werte aller weißen bis weißgrauen Marmore. Rechte Spalte Mittelwerte Kalksteine (WEDEPOHL 1970). Um den Abstand zwischen Median und Mittelwert nicht zu verkleinern, wurde auf Rundungen weitgehend verzichtet. Alle Angaben außer Quarz, Dolomit und Mg in ppm.....	92
Tabelle 21: Eigenwerte und Korrelation der verwendeten kanonischen Diskriminanzfunktionen .	102
Tabelle 22: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten und Strukturmatrix aus Diskriminanzanalyse.....	102
Tabelle 23: Klassifizierungsergebnisse von 134 Marmorproben aus der Diskriminanzanalyse	103
Tabelle 24: Geochemische Kennwerte karbonatischer Phasen in verschiedenen Gesteinstypen von Marmara	121
Tabelle 25: Merkmale prokonnesischer Marmore von Marmara und am Pergamonaltar (nach GERMANN & CRAMER in press)	123
Tabelle 26: Geochemische Daten von Muğla-Marmoren.....	154
Tabelle 27: Merkmale von Marmoren und Kalksteinen aus Ephesos sowie vom Dionysostempel in Pergamon	165
Tabelle 28: Synopsis einiger Merkmale parischer und naxischer Marmore nach Literaturangaben und eigenen Messungen (ohne Wiederholung aller Angaben aller Autoren).....	175
Tabelle 29: Zuordnung aller antiken Objekte zu Lagerstätten nach geowissenschaftlichen Gesichtspunkten.....	181
Tabelle 30: Bereich (min/max) von Messwerten und Merkmalen der Marmorartefakte (außer von Pergamon) mit einer Auswahl passender Lagerstätten: Afr: Aphrodisias, BG: Bafa Gölü (Hk:	

Herakleia, MTW, MTO: Milet West [Ost], MyLS28: Steinbruch zwischen Myus und NW-Ufer des Bafa-Sees), Car: Carrara, Ef: Ephesos, MgLS: Lagerstätte N von Magnesia/M, Mm: Marmara (=Prokonnesos), ParWmt: Paros Westliches Marmortal = Par2, Pent: Penteli, Pri: Priene. DS: Dünnschliff, fk, mk, gk: fein-, mittel-, grobkörnig, MGS aus drei größten Körnern, AGS parallel u. senkrecht zu evtl. Kornlänge KL (tw. mehrere DS)	183
Tabelle 31: Streubereiche einiger Kennwerte der mittel-grobkörnigeren Variante der Herakleia-Marmore (MGS, AGS: Maximaler und mittlerer Korndurchmesser, ΣSEE: Summe der Selten Erdelemente)	192
Tabelle 32: Kennwerte der Marmore vom Artemistempel (Altar, Sima, Kapitell) und von den Lagerstätten bei Magnesia, Herakleia, Milet West und Ephesos Kursak	212
Tabelle 33: Lithostratigraphie in der Umgebung von Pergamon (BRINKMANN & IZDAR 1971).....	213
Tabelle 34: Merkmale von Kozak-Marmoren	218
Tabelle 35: Petrographische und geochemische Merkmale antiker Marmorartefakte aus Pergamon und ihnen zugeordneten STEINBRÜCHEN. N: Anzahl der Messproben, MGS: maximum grain size; het/hom: heterogenes oder homogenes Gefüge; za/ger: gezahnte/gerade Korngrenzen; Dol: Dolomit (XRD); Od: Geruch, $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$: stabile Isotopen in Promille auf PDB-Standard; ΣSEE/Y: Summe der SEE zu Y; Cer _{neg} : negative Cer-Anomalie bez. auf PAAS (1 sehr schwach, 0.2 sehr ausgeprägt).....	220
Tabelle 36: Auszug geochemischer Daten aus Tabelle 27 der Aytekin- und Dionysostempel-Marmore	232
Tabelle 37: Struktur des Question Editors im Expertensystem	248
Tabelle 38: Fragen und Optionen im Question Editor des Expertensystems (ohne „don't know“, Isotopie zusammengefasst)	249
Tabelle 39: Numerische Verknüpfung der Merkmale (hier Record MARMARA) in der Knowledge Base	249
Tabelle 40: (Anhang) Geochemische Merkmale eines Vulkanits vom Kozak	331

9.3 Literaturverzeichnis

- ABRALDES, A. M. (1996): *Pentelethen : the export of Pentelic marble and its use in architectural and epigraphical monuments - Thesis (Ph. D.)*, University of California, Berkeley, 517 S.
- ACCARDO, G., MASSA, S., ROSSI, D. P., SAMMURI, P. & TABASSO, M. (1981): *Artificial weathering of Carrara Marble; relationships between the induced variations of some physical properties* – In: ROSSI MARARESE, R. (Hrsg.) *The conservation of stone II.*, Vol. 31, 243-273, Bologna, Italy (Centro per la Conservazione delle Sculture All'Aperto).
- AGDEMIR, N. (1997): *Gold-führende Epithermalsysteme in den Ostpontiden, NE-Türkei*, Dissertation, Techn. Univ., Clausthal-Zellerfeld, 159 S.
- AKCAY, H., DEMIR, C., OZER, U. & GUCER, S. (1999): *Chemometric characterization studies of marbles by atomic absorption spectrometry* – *Chemia Analytyczna*, **44**(3B): 577-589.
- AKSOY, R. (1995): *Stratigraphy of the Marmara island and the Kapidag peninsula (Marmara adasi ve Kapidag yarimadasi'nin stratigrafisi)* – *Türkiye Petrol. Jeologlari Dernegi Bülteni*, **7**(1): 33-49.
- AKSOY, R. (1999): *Marmara Adasi'nda ilerleyen bölgesel metamorfizma ile tektonik tarihçe arasındaki ilişki* – *Türkiye Jeoloji Bulteni = Geological Bulletin of Turkey*, **42**(1): 1-14.
- AKYUREK, B., ERCAN, T., TURKECAN, A. & GUNAY, E. (1984): *Petrology of igneous rocks of the Dikili-Bergama-Candarli region, Turkey* – *International Geological Congress, Moscow, Abstracts*, **27**(Vol. IX, Part 2): 170.
- AKYUZ, H. S. & OKAY, A. I. (1998): *The geology of the south of Manyas (Balikesir) and tectonic significance of blueschists* – *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, **120**: 81-95.
- ALBER, M. & HAUPTFLEISCH, U. (1999): *Generation and visualization of microfractures in Carrara marble for estimating fracture toughness, fracture shear and fracture normal stiffness* – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **36**(8): 1065-1071.
- ALESIANI, M., CAPUANI, S., MARAVIGLIA, B., GIORGI, R. & BAGLIONI, P. (2002): *Effects induced in marbles by water-repellent compounds: the NMR contribution* – *Applied Magnetic Resonance*, **23**(1): 63-73.
- ALESIANI, M., CAPUANI, S. & MARAVIGLIA, B. (2003): *NMR applications to low porosity carbonate stones* – *Magnetic Resonance Imaging*, **21**(7): 799-804.
- ALESSANDRINI, G., AGLIETTO, M., CASTELVETRO, V., CIARDELLI, F., PERUZZI, R. & TONIOLO, L. (2000): *Comparative evaluation of fluorinated and unfluorinated acrylic copolymers as water-repellent coating materials for stone* – *Journal of Applied Polymer Science*, **76**(6): 962-977.
- ALTIERI, A. & RICCI, S. (1997): *Calcium uptake in mosses and its role in stone biodeterioration* – *International Biodeterioration & Biodegradation*, **40**(2-4): 201-204.
- ALTUNKAYNAK, S. & YILMAZ, Y. (1998): *The Mount Kozak magmatic complex, western Anatolia* – In: GOURGAUD, A. (Hrsg.) *Volcanism in Anatolia.*, Vol. 85; 1-4, 211-231, Amsterdam, Netherlands (Elsevier).
- ALVAREZ I PEREZ, A. & DE BRU DE SALA, E. (1984): *Els marbres de Paros i Naxos. La seva utilització a Empúries* – *Ampunas (Barcelona)*, **45-46**: 294-301.
- ANDERS, E. & GREVESSE, N. (1989): *Abundances of the elements: Meteoric and solar* – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53**: 197-214.
- ANDERSON, T. F. & ARTHUR, M. A. (1983): *Stable Isotopes of oxygen and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems*, *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*, SEPM Short Course No10, Dallas.
- ANDREA, B., OEHLSCHEGEL, G. & WEBER, K. (1972): *Zusammenfügung der Fragmente eines Meleager Sarkophags in Frankfurt und Kassel* – *Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts*, **87**: 388-432.
- ANGELIER, J., GLACON, G. & MULLER, C. (1978): *Sur la présence et la position tectonique du Miocène inférieur marin dans l'archipel de Naxos (Cyclades, Grèce)* – *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Série D: Sciences Naturelles*, **286**(1): 21-24.
- ANONYMOUS (1846): *Marble quarries at Carrara [Italy]* – *Anglo-American, a Journal of Literature, News, Politics, the Drama, Fine Arts, etc.*, **7**: 260.
- ANOVITZ, L. M. & ESSENE, E. J. (1987): *Phase equilibria in the system CaCO₃-MgCO₃-FeCO₃* – *Journal of Petrology*, **28**: 389-414.

- ARCHONTIDOU, A. & ACHEILARA, L. (1999): *Archaeological Museum of Mytilene*, Ministry of Culture - K' Ephorate of Prehistoric & Classical Antiquities, Mytilene, Lesbos, 159 S.
- ARIKAN, M. (1963): *Turkish marbles* – Symposium on industrial rocks and minerals, Lahore, Pakistan, 1962: 177-178.
- ARMIENTO, G., ATTANASIO, D. & PLATANIA, R. (1997): *Electron spin resonance study of white marbles from Tharros (Sardinia): a reappraisal of the technique, possibilities and limitations* – *Archaeometry*, **39**(2): 309-319.
- ARNI, P. (1941): *Tuerkiyede halen malum bulunan boksit yataklari; ueber die heute bekannten Bauxit-Vorkommen der Tuerkei* –
- ASBOECK, A. (1913): *Das Staatswesen von Priene in hellenistischer Zeit*, Seitz, München, 128 S.
- ASGARI, N. (1977): *Die Halbfabrikate kleinasiatischer Girlandensarkophage und ihre Herkunft* – *Archäologischer Anzeiger*: 329-380.
- ASGARI, N. (1978): *Roman and early Byzantine Marble Quarries of Proconnesus* – In: The Proceedings of the Xth International Congress of Classical Archaeology, Ankara-Izmir 1973, 467-480.
- ASGARI, N. (1988): *The stages of workmanship of the Corinthian capital in Proconnesus and its export form* – In: HERZ, N. & WAELKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble : geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 115-125, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- ASGARI, N. (1992): *Observations on two types of quarry-items from Proconnesus; column-shafts and column-bases* – In: WAELKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 73-80, Leuven, Belgium (Leuven University Press).
- ASGARI, N. & MATTHEWS, K. J. (1995): *The stable isotope analysis of marble from Proconnesus* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) *The Study of Marble and Other Stones Used in Antiquity*, 123-129, London (Archetype Publications).
- ASMUS, J. F. (1978): *Properties of laser-cleaned Carrara Marble surfaces* – In: WINKLER, E. M. (Hrsg.) *Decay and preservation of stone.*, Vol. 11, 81-88, Boulder, CO, United States (Geological Society of America).
- ATALEY, E. (1976): *Antiker Marmorsteinbruch bei Ephesos* – *ÖJh*, **51**: 59-60.
- ATALEY, E. (1985): *Die antiken Marmorsteinbrüche von Kusini* – In: *Lebendige Altertumswissenschaft*, Festgabe Hermann Vetters, 311-314, Wien
- ATTANASIO, D., ARMIENTO, G., BRILLI, M., EMANUELE, M. C., PLATANIA, R. & TURI, B. (2000): *Multi-method marble provenance determinations: the Carrara marbles as a case study for the combined use of isotopic, electron spin resonance and petrographic data* – *Archaeometry*, **42**(2): 257-272.
- ATTANASIO, D. (2003): *Ancient white marbles: analysis and identification by paramagnetic resonance spectroscopy*, "L'Erma" di Bretschneider, Roma, 283 S.
- ATTANASIO, D., DE MARINIS, G., PALLECCHI, P., PLATANIA, R. & ROCCHI, P. (2003a): *An EPR and isotopic study of the marbles of the Trajan's arch at Ancona: An example of alleged Hymettian provenance* – *Archaeometry*, **45**: 553-568.
- ATTANASIO, D., HERZ, N. & KANE, S. (2003b): *New isotopic and EPR data for 22 sculptures from the extramural sanctuary of Demeter and Persephone at Cyrene* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- ATTANASIO, D., KANE, S., PLATANIA, R. & ROCCHI, P. (2003c): *The use of calcitic and dolomitic Thasian marbles at Cyrene* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- ATTENDORN, H.-G. & BOWEN, R. N. C. (1997): *Radioactive and Stable Isotope Geology*, Chapman & Hall, London, Weinheim, 522 S.
- AUGUSTITHIS, S. S. (1985): *Atlas of the Textural Patterns of Metamorphosed (Transformed and Deformed) Rocks and their Genetic Significance*, Theophrastus Publications S.A., Athens, 400 S.
- AVDELIDIS, N. P. & MOROPOULOU, A. (2004): *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures* – *Journal of Cultural Heritage*, **5**(1): 119-127.
- BACKERS, T., STEPHANSSON, O. & RYBACKI, E. (2002): *Rock fracture toughness testing in Mode II - punch-through shear test* – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**(6): 755-769.
- BAERTSCHI, P. (1957): *Messung und Deutung relativer Häufigkeitsvariationen von O¹⁸ und C¹³ in Karbonaten und Mineralien* – *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen = Bulletin Suisse de Mineralogie et Petrographie*, **37**(37-152).

- BAIETTO, V., VILLENEUVE, G., SCHVOERER, M., BECHTEL, F. & HERZ, N. (1999): *Investigation of electron paramagnetic resonance peaks in some powdered Greek white marbles* – *Archaeometry*, **41**(2): 253-265.
- BAIETTO, V., VILLENEUVE, G., GUIBERT, P. & SCHVOERER, M. (2000): *EPR and TL correlation in some powdered Greek white marbles* – *Applied Radiation and Isotopes*, **52**(2): 229-235.
- BAKER, P. A., GIESKES, J. M. & ELDERFIELD, H. (1982): *Diagenesis of carbonates in deep-sea sediments - evidence from Sr-Ca ratios and interstitial water dissolved Sr²⁺ data* – *J. Sediment. Petrol.*, **50**: 71-82.
- BALASHOV, V. N. & YARDLEY, B. W. D. (1998): *Modeling metamorphic fluid flow with reaction-compaction-permeability feedbacks* – *American Journal of Science*, **298**(6): 441-470.
- BALLERINI, G., BRACCI, S., PANTANI, L. & TIANO, P. (2001): *Lidar remote sensing of stone cultural heritage: detection of protective treatments* – *Optical Engineering*, **40**(8): 1579-1583.
- BAMMER, A. (2000): *Marbles at Ephesus and their relation to Paros* – In: SCHILARDI, D. U. & KATSONOPOULOU, D. (Hrsg.) *Paria Lithos - First International Congress of the Archaeology of Paros and the Cyclades 1997*, 437-444, Athens
- BARBIN, V., RAMSEYER, K., BURNS, S. J., DECROUEZ, D. & FALTERMEIER, K. (1990): *Cathodoluminescence et isotopes stables des marbres blancs de quelques statues de l'Antikenmuseum de Bale* – In: 13e reunion des sciences de la terre, Vol. 13, 9, Paris, France (Societe Geologique de France).
- BARBIN, V., RAMSEYER, K., DECROUEZ, D., BURNS, S. J., CHAMAY, J. & MAIER, J. L. (1992): *Cathodoluminescence of white marbles: an overview* – *Archaeometry*, **34**(2): 175-183.
- BARGU, S. & TURGUT, M. (1997): *Büyük menderes ile küçük menderes grabenleri arasindaki bolgenin miyosen ve miyosen sonrasi yapisal ozellikleri* – *Yerbilimleri Dergisi = Engineering Faculty's Earth Sciences Reviewd, Istanbul Universitesi, Muhendislik Fakultesi*, **8**(1-3): 25-34.
- BARIC, L. (1963): *Über die orientierte Verwachsung des Diaspors und des Korunds von Sivec in Mazedonien* – *Beiträge zur Mineralogie und Petrologie*, **9**(2): 133-138.
- BARNHOORN, A., BYSTRICKY, M., BURLINI, L. & KUNZE, K. (2004): *The role of recrystallisation on the deformation behaviour of calcite rocks: large strain torsion experiments on Carrara marble* – *Journal of Structural Geology*, **26**(5): 885-903.
- BARONI, C., BRUSCHI, G. & RIBOLINI, A. (2000): *Human-induced hazardous debris flows in Carrara marble basins (Tuscany, Italy)* – *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**(1): 93-103.
- BARR, S. R., TEMPERLEY, S. & TARNEY, J. (1999): *Lateral growth of the continental crust through deep level subduction-accretion: a re-evaluation of central Greek Rhodope* – *Lithos*, **46**(1): 69-94.
- BARRERA, E. & SAVIN, S. M. (1987): *Effect of sample preparation on the d¹⁸O-value of fine grained calcite* – *Chemical Geology - Isotope Geoscience Section*, **66**: 301-305.
- BAU, M., DULSKI, P. & MÖLLER, P. (1995): *Yttrium and holmium in South Pacific seawater: Vertical distribution and possible fractionation mechanisms* – *Chemie der Erde*, **55**: 1-15.
- BAU, M., MÖLLER, P. & DULSKI, P. (1996): *Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling* – *Marine Chemistry*, **56**: 123-131.
- BAUER, A., HANNIBAL, J. T., HANSON, C. B. & ELMORE, J. V. (2002): *Distribution in time, provenance, and weathering of gravestones in three northeastern Ohio cemeteries* – *Ohio Journal of Science*, **102**(4): 82-96.
- BAVASTRO, R., BELLINI, L., DOLCI, E. & GIUMELLI, A. L. (2002): *Carrara und seine Marmorbrüche*, Società Editrice Apuana, 130 S.
- BAY, B. (2002): *Anthropogen induzierte Bodenerosion und Deltavorbau im Büyük Menderes Delta (SW-Türkei)* – <<http://www.ruhr-uni-bochum.de/milet/in/geo-meandr.htm>> eingesehen 1.3.2004
- BAYHAN, S. (2000): *Priene, Miletos, Didyma*, Keskin Color AS, Istanbul, 144 S.
- BENEDETTI, E., D'ALESSIO, A., ZINI, M. F., BRAMANTI, E., TIRELLI, N., VERGAMINI, P. & MOGGI, G. (2000): *Characterization of acrylic resins and fluoroelastomer blends as potential materials in stone protection* – *Polymer International*, **49**(8): 888-892.
- BERGEMANN, J. (2002): *Datenbank der attischen Grabreliefs Projekt DYABOLA*, Biering & Brinkmann, München, 1 DVD-ROM S.
- BERGER, A. (2004): *An improved equation for crystal size distribution in second-phase influenced aggregates* – *American Mineralogist*, **89**(1): 126-131.
- BERNAL, J. L. P. & BELLO, M. A. (2003): *Modeling sulfur dioxide deposition on calcium carbonate* – *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **42**(5): 1028-1034.
- BESTMANN, M. (2000): *Evolution of a shear zone in calcite marble on Thassos Island, Northern Greece results from microfabrics and stable isotopes*, Erlangen, 127 S.

- BINGÖL, O. (1998): *Menderes Magnesias = Magnesia ad Maeandrum*, Aydın, 108 S.
- BIRICOTTI, F. & SEVERI, M. (2003): *A non-destructive methodology for the characterization of white marble of artistic and archaeological interest* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- BIRICOTTI, F. & SEVERI, M. (2004): *A non-destructive methodology for the characterization of white marble of artistic and archaeological interest* – Journal of Cultural Heritage, **5**(1): 49-61.
- BLANC, P., BLANC, A., DECROUEZ, D., PROZ, P.-A. & RAMSEYER, K. (2003): *In-situ cathodoluminescence measurements on surfaces of archaeological artifacts* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- BLÜMEL, C. (1963): *Die archaisch griechischen Skulpturen der staatlichen Museen zu Berlin.*, 7-10.
- BLÜMNER, H. (1875): *Technologie und Terminologie der Gewerbe und Künste bei Griechen und Römern*, III, Teubner, Leipzig.
- BOGOMOLOVA, E. V., VLASOV, D. Y. & SAGULENKO, E. S. (1997): *Comparative analysis of marble specific mycobiota* – Mikologiya I Fitopatologiya, **31**(5): 9-15.
- BOGOMOLOVA, E. V. (1999): *Morphological potential of Phaeococcomyces sp (strain Ch 49) - a typical representative of microcolonial lithobiontic fungi* – Mikologiya I Fitopatologiya, **33**(2): 95-100.
- BOGOMOLOVA, E. V., VLASOV, D. Y. & PANINA, L. K. (2000): *Morphometrical comparison of the series of strains of black yeasts Phaeococcomyces exophiale* – Mikologiya I Fitopatologiya, **34**(2): 40-47.
- BOHN, R. & DROYSEN, H. (1885): *Das Heiligtum der Athena Polias Nikephoros* – Altertümer von Pergamon, **II**: 143 S.
- BOHN, R. (1896): *Die Theater-Terrasse*, W. Spemann, Berlin, 83 S.
- BOHTZ, C. H. (1981): *Das Demeter-Heiligtum* – Altertümer von Pergamon, **13**: 40-62.
- BOKE, H., GOKTURK, E. H. & SALTİK, E. N. C. (2002): *Effect of some surfactants on SO₂-marble reaction* – Materials Letters, **57**(4): 935-939.
- BOKE, H. & GAURI, K. L. (2003): *Reducing marble-SO₂ reaction rate by the application of certain surfactants* – Water Air and Soil Pollution, **142**(1-4): 59-70.
- BOLIVAR, F. C. & SANCHEZ-CASTILLO, P. M. (1997): *Biomineralization processes in the fountains of the Alhambra, Granada, Spain* – International Biodeterioration & Biodegradation, **40**(2-4): 205-215.
- BORG, B., BORG, G. & STRAUSS, H. (2000): *A combined isotopic, petrographic, and archaeological provenance study of the marble sources for the Apollo temple of Didyma, W-Anatolia* – In: RAMMLMAIR ET AL. (Hrsg.) Applied Mineralogy, 951-954, Rotterdam (Balkema).
- BORG, B. & BORG, G. (2002a): *The history of Apollo's temple at Didyma, as told by marble analyses and historical sources* – In: LAZZARINI, L. (Hrsg.) ASMOSIA VI - Proceedings of the Sixth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Venice, June 15-18 2000. Interdisciplinary Studies on Ancient Stone, 271-278, Padova (Aldo Ausilio - Bottega d'Erasmus Editore).
- BORG, G. & BORG, B. (1998): *Die unsichtbaren Steinbrüche. Zur Bausteinprovenienz des Apollon-Heiligtums von Didyma* – Antike Welt, **29**: 509-518.
- BORG, G. & BORG, B. (2002b): *From small quarries to large temples - The enigmatic source of limestone for the Apollo Temple at Didyma, W-Anatolia* – In: LAZZARINI, L. (Hrsg.) ASMOSIA VI - Proceedings of the Sixth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Venice, June 15-18 2000. Interdisciplinary Studies on Ancient Stone, 427-436, Padova (Aldo Ausilio - Bottega d'Erasmus Editore).
- BÖRNER, H. & HILL, D. (2002): *Große Enzyklopädie der Steine. 1 CD, Ausgabe 2002*, Abraxas Verlag, Hasede.
- BOULVAIN, F., DE RIDDER, C., MAMET, B., PREAT, A. & GILLAN, D. (2001): *Iron microbial communities in Belgian Frasnian carbonate mounds* – Facies, **44**: 47-59.
- BOZKURT, E. (2001): *Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, western Turkey* – International Journal of Earth Sciences, **89**: 728-744.
- BOZKURT, E. & OBERHÄNSLI, R. (2001): *Menderes Massif (Western Turkey): structural, metamorphic and magmatic evolution - a synthesis* – International Journal of Earth Sciences, **89**: 679-708.
- BRADY, J. B., MARKLEY, M. J., SCHUMACHER, J. C., CHENEY, J. T. & BIANCIARDI, G. A. (2004): *Aragonite pseudomorphs in high-pressure marbles of Syros, Greece* – Journal of Structural Geology, **26**(1): 3-9.

- BRAGATO, C., DANIELE, S., BALDO, M. A. & DENUAULT, G. (2002): *Oxygen as redox mediator in scanning electrochemical microscopy. Application to the study of localised acid attack of marble* – *Annali Di Chimica*, **92**(3): 153-161.
- BRASS, G. W. (1976): *The variation of the marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio during the Phanerozoic time: interpretation using a flux model* – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **40**: 721-730.
- BREVART, O. & ALLEGRE, C. J. (1977): *Strontium isotopic ratios in limestones through geologic time as a memory of geodynamic regimes* – *Bull. Soc. Geol. France*, (19): 1253-1257.
- BRILLI, M., BRUNO, T., MARIA, M. P. & GIANCARLO, C. (2004a): *$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratios in provenance determination of classical marbles: the case of quarries discrimination of Thasos island* – *Archaeometry 2004, Zaragoza* - <http://161.116.85.21/mainpage/abstracts/stone/brilli.pdf>, eingesehen 30.4.2004
- BRILLI, M., TURI, B. & CAVAZZINI, G. (2004b): *New data of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in classical marbles: an initial database for marble provenance determination* – *Archaeometry 2004, Zaragoza* - <http://161.116.85.21/mainpage/abstracts/stone/brilli2.pdf>, eingesehen 30.4.2004
- BRINKMANN, R. & IZDAR, E. (1971): *Excursion to Bergama (Pergamon) and Kinik* – In: *Geology and history of Turkey.*, Vol. 13, 509-511, (Campbell, A.S., Tripoli, Libya).
- BRINKMANN, R. (1976): *Geology of Turkey*, Enke, Stuttgart, ix, 158 S.
- BRÜCKNER, H. (1999): *Ausgrabungen in Milet - Geoarchäologie* – <<http://www.ruhr-uni-bochum.de/milet/in/geologie.htm>> eingesehen 1.3.2004
- BRUNI, S., CARIATI, F., BIANCHI, C. L., ZANARDINI, E. & SORLINI, C. (1995): *Spectroscopic investigation of red stains affecting the Carrara marble facade of the Certosa of Pavia* – *Archaeometry*, **37**(2): 249-255.
- BRUNO, M., LAZZARINI, L., SOLIGO, M., TURI, B. & VARTI MATARANGAS, M. (2000): *The ancient quarry at Karavos (Paros) and the characterization of its marble* – In: SCHILARDI, D. U. & KATSONOPOULOU, D. (Hrsg.) *Paria Lithos - Parian quarries, marble and workshops of sculpture. Proceedings of the First International Conference of the Archaeology of Paros and the Cyclades, Paros, 2-5 october 1997 Athens*
- BRUNO, M., PENSABENE, P., CONTI, L., TURI, B. & LAZZARINI, L. (2002): *White marble quarries and architectural marbles of Cape Tainaron, Greece* – In: HERRMANN, J., HERZ, N. & NEWMAN, R. (Hrsg.) *ASMOSIA 5, Interdisciplinary Studies on Ancient Stone* – *Proceedings of the Fifth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Museum of Fine Arts, Boston, June 1998, 36-46, London (Archetype Publications).*
- BRUSCHI, G., CRISCUOLO, A., PARIBENI, E. & ZANCHETTA, G. (2004): *C-14-dating from an old quarry waste dump of Carrara marble (Italy): evidence of pre-Roman exploitation* – *Journal of Cultural Heritage*, **5**(1): 3-6.
- BUCHER, K. (1998): *Growth mechanisms of metasomatic reaction veins in dolomite marbles from the Bergell Alps* – *Mineralogy and Petrology*, **63**(3-4): 151-171.
- BUICK, I. S. & CARTWRIGHT, I. (2000): *Stable isotope constraints on the mechanism of fluid flow during contact metamorphism around the Marulan Batholith, NSW, Australia* – *Journal of Geochemical Exploration*, **69**: 291-295.
- BURKE, W. H., DENISON, R. E., HETHERINGTON, E. A., KOEPNICK, R. B., NELSON, H. F. & OTTO, J. B. (1982): *Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time* – *Geology*, **10**: 516-19.
- BURLINI, L. & KUNZE, K. (2000): *Fabric and seismic properties of Carrara marble mylonite* – *Physics and Chemistry of the Earth Part a-Solid Earth and Geodesy*, **25**(2): 133-139.
- CABRAL, J. M. P., VIEIRA, M. C. R., CARREIRA, P. M., FIGUEERREDO, M. O., PENA, T. P. & TAVARES, A. (1992): *Preliminary study on the isotopic and chemical characterisation of marbles from Alto Alentejo (Portugal)* – In: WAELKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient Stones: Quarrying, Trade and Provenance, 191-198, Leuven, Belgium (Leuven University Press).*
- CAMPANELLA, L., GREGORI, E., TOMASSETTI, M. & VISCO, G. (2001): *Identification of different types of imperial age marble finds using instrumental chemical analysis and pattern recognition analysis* – *Annali Di Chimica*, **91**(11-12): 701-718.
- CAMUFFO, D. & GIORIO, R. (2003): *Quantitative evaluation of water deposited by dew on monuments* – *Boundary-Layer Meteorology*, **107**(3): 655-672.
- CANDAN, O., DORA, O. O., OBERHÄNSLI, R., CETINKAPLAN, M., PARTZSCH, J. H. & DURR, S. (1999): *Tertiary high-pressure/ low-temperature metamorphism in the northwest part of the Menderes Massif and correlation with the Cycladic Complex, Greece* – *Geological Bulletin of Turkey*, **41**(1): 1-14.

- CAPEDRI, S., VENTURELLI, G. & PHOTIADES, A. (2004): *Accessory minerals and delta O-18 and delta C-13 of marbles from the Mediterranean area* – Journal of Cultural Heritage, **5**(1): 27-47.
- CARDARELLI, E. & DE NARDIS, R. (2001): *Seismic refraction, isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino and Faustina temple AD 141)* – Geophysical Prospecting, **49**(2): 228-240.
- CARFAGNI, C. R. (2004): *Granular decohesion thermal-damage in marble monuments* – In: Novel Approaches in Civil Engineering, Vol. 14, 177-185, Berlin (Springer-Verlag).
- CARRINO, L., POLINI, W. & TURCHETTA, S. (2002): *An automatic visual system for marble tile classification* – Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, **216**(8): 1095-1108.
- CARTER, J. C. (1983): *The sculpture of the sanctuary of Athena Polias at Priene* – Reports of the Research Committee of the Society of Antiquaries of London, **42**: 367 S.
- CASTELNUOVO, E. (1992): *Niveo de marmore : l'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo*, Edizioni Colombo, Genova, 370 S.
- CASWELL, P. (2001): *Expert System Builder*, Version 4.2.2, <http://www.esbuilder.com/>.
- CATTANEO, S. & LABUZ, J. F. (2001): *Damage of marble from cyclic loading* – Journal of Materials in Civil Engineering, **13**(6): 459-465.
- CELESTINO, T., PILTNER, R., MONTEIRO, P. J. M. & OSTERTAG, C. P. (2001): *Fracture mechanics of marble using a splitting tension test* – Journal of Materials in Civil Engineering, **13**(6): 407-411.
- CHABAS, A. & JEANNETTE, D. (2001): *Weathering of marbles and granites in marine environment: petro-physical properties and special role of atmospheric salts* – Environmental Geology, **40**(3): 359-368.
- CHAMAY, J., MAIER, J. L., MOENS, L., PAEPE, P. D., BARBIN, V., RAMSEYER, K., DECROUEZ, D., ROOS, P. & WAELKENS, M. (1990): *L'origine des marbres blancs de quelques statues du Musée d'Art et d'Histoire de Genève. Etude scientifique pluridisciplinaire* – Antike Kunst, **33**(2).
- CHANDLER, R., REVETT, N., PARS, W. & SOCIETY OF DILETTANTI. (1769): *Ionian antiquities*, printed by T. Spilsbury and W. Haskell, London, 53 S.
- CHEN, G. L. & OKRUSCH, M. (1991): *Phase relationships in polymetamorphic meta-sediments of Samos, Cycladic blue schist belt, Greece* – In: Sixth meeting of the European Union of Geosciences., Vol. 3; 1, 87, Oxford, International (Blackwell Scientific Publications).
- CHEN, G. L. & OKRUSCH, M. (1992a): *Compositions of blueschist and greenschist facies garnets from metapelitic rocks of Samos, Greece* – In: Referate der Vortraege und Poster, 70. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Vol. 1992; 1, 52, Stuttgart, Federal Republic of Germany (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- CHEN, G. L. & OKRUSCH, M. (1992b): *The high pressure blueschist facies metamorphism on Samos, Greece; a study of metapelites by Schreinemakers-method* – In: Referate der Vortraege und Poster, 70. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Vol. 1992; 1, 53, Stuttgart, Federal Republic of Germany (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- CHEN, G. Y. & LIN, Y. M. (2004): *Stress-strain-electrical resistance effects and associated state equations for uniaxial rock compression* – International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **41**(2): 223-236.
- CHEN, Y. J., LIU, C. Q., CHEN, H. Y., ZHANG, Z. J. & LI, C. (2000): *Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China: implications for several geoscientific problems* – Acta Petrologica Sinica, **16**(2): 233-244.
- CHIANTORE, O., POLI, T., COLOMBO, C., PERUZZI, R. & TONIOLO, L. (2001): *Effect of fluorinated groups on photooxidative stability of polymeric protectives applied on marble* – Annali Di Chimica, **91**(11-12): 741-748.
- COLEMAN, M. & WALKER, S. (1979): *Stable Isotope Identification of Greek and Turkish Marbles* – Archaeometry, **21**(1): 107-112.
- CONFORTO, L., FELICI, M., MONNA, D., SERVA, L. & TADDEUCCI, A. (1975): *A Preliminary Evaluation of Chemical Data (Trace Elements) from Classical Marble Quarries in the Mediterranean* – Archaeometry, **17**(2): 201-213.
- CONSIGLIO, A. (1972): *A technical guide to the rational use of marble*, Italian Marble Industries, Milan, 222 S.
- CONZE, A. (1913): *Stadt und Landschaft* – Altertümer von Pergamon, **I**(2).

- CORAZZA, M., PRATESI, G., CIPRIANI, C., LO GUIDICE, A., ROSSI, P., VITTONI, E., MANFREDOTTI, C., PECCHIONI, E., MANGANELLI DEL FA, C. & FRATINI, F. (2001): *Ionoluminescence and cathodoluminescence in marbles of historic and architectural interest* – *Archaeometry*, **43**: 439-446.
- CORDISCHI, D., MONNA, D. & SEGRE, A. L. (1983): *ESR Analysis of Marble Samples from Mediterranean Quarries of Archaeological Interest*. – *Archaeometry*, **25**(1): 68-76.
- CORDISCHI, D., MONNA, D., PASSARIELLO, B. & PENSABENE, P. (1988): *Marble samples from the Arch of Constantine in Rome; results of electron spin resonance and atomic emission analysis* – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble; geochemistry, technology, trade.*, Vol. 153, 453-462, Leiden, International (Noordhoff International Publishing).
- CORSI, F. (1825): *Catalogo ragionato d'una collezione di pietre di decorazione formata e posseduta in Roma dall' avvocato Faustino Corsi*, Da' Torchj del Salviucci, Roma, 235 S.
- CORSI, F. (1827): *Supplemento al Catalogo ragionato d'una collezione di pietre di decorazione formata in Roma dall' avvocato Faustino Corsi acquistata dall' onorevole Signor Stefano Jarrett Inglese e posseduta dall' Universita di Oxford*, Da' Torchj del Salviucci, Roma, 28 S.
- COSTAGLIOLA, P., BENVENUTI, M., MAINERI, C., LATTANZI, P. & RUGGIERI, G. (1999): *Fluid circulation in the Apuane Alps core complex: evidence from extension veins in the Carrara marble* – *Mineralogical Magazine*, **63**(1): 111-122.
- COSTEDOAT, C. & ALVINERIE, J. (1991): *Essai de caracterisation du marbre blanc; approche methodologique* – In: LORENZ, J. & BENOIT, P. (Hrsg.) *Carrieres et constructions en France et dans les pays limitrophes; actes du 115 (super e) congres national des Societes savantes, Section des Sciences et Section d'Histoire des Sciences et des Techniques 1990*, Vol. 7, 175-187, Paris, France (Ed. du Comite des Travaux Historiques et Scientifiques).
- COVEY, C. S. J. (2001): *Variation of the exponential and power law creep parameters with strain for Carrara Marble deformed at 120 degrees to 400 degrees C* – *Geophysical Research Letters*, **28**(12): 2301-2304.
- COVEY-CRUMP, S. J. (1998): *Evolution of mechanical state in Carrara marble during deformation at 400 degrees to 700 degrees C* – *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **103**(B12): 29781-29794.
- CRAIG, H. (1957): *Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide* – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **12**: 133-149.
- CRAIG, H. & CRAIG, V. (1972): *Greek Marbles: Determination of Provenance by Isotopic Analysis* – *Science*, **176**(2): 401-403.
- CRAMER, T. (1996): *Die Marmore des Telephosfrieses am Pergamonaltar - Ein Beitrag zu ihrer Herkunftsbestimmung mit petrographischen, geochemischen und isotopengeochemischen Untersuchungen*, Diplomarbeit Fachgebiet Lagerstättenforschung & Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität, Berlin, 114 S.
- CRAMER, T., GERMANN, K. & WINKLER, F. J. (1996a): *Caratteristiche dei Marmi del Fregio di Telefo* – In: *L'Altare di Pergamo, il fregio di Telefo*, 146-148, Milano
- CRAMER, T., GERMANN, K. & WINKLER, F. J. (1996b): *Characteristics of the Telephos Frieze Marble* – In: DREYFUS, R. & SCHRAUDOLPH, E. (Hrsg.) *Pergamon - The Telephos Frieze from the Great Altar*, Vol. 2, 155-158, (Katalog Fine Arts Museum, San Francisco).
- CRAMER, T. (1998): *Die Marmore des Telephosfrieses am Pergamonaltar* – *Berliner Beiträge zur Archäometrie*, **15**: 95-198.
- CRAMER, T., GERMANN, K., WINKLER, F. J. & SCHMIDT, H. L. (1998): *Isotope-geochemical and mineralogical-petrographic characteristics of the Pergamon Altar marble* – *Isotopes Environ. Health Stud.*, **34**: 169-176.
- CRAMER, T., GERMANN, K. & HEILMEYER, W.-D. (2001): *Herkunfts- und verwendungstypische Materialeigenschaften von Marmoren ausgewählter Grabungsfunde der Antikensammlung, Staatliche Museen zu Berlin, Preussischer Kulturbesitz*. – In: SCHÜSSLER, U. & FUCHS, R. (Hrsg.) *Archäometrie und Denkmalpflege - Kurzberichte Archäometrietagung Köln 2001*, ISSN 0949-4057, 50-52, Köln
- CRAMER, T., GERMANN, K. & HEILMEYER, W.-D. (2002): *Petrographic and geochemical characterization of the Pergamon Altar marble in the Pergamon Museum, Berlin* – In: LAZZARINI, L. (Hrsg.) *ASMOSIA VI - Proceedings of the Sixth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity*, Venice, June 15-18, 2000. *Interdisciplinary Studies on Ancient Stone*, 285-292, Padova (Aldo Ausilio - Bottega d'Erasmus Editore).
- CRAMER, T., GERMANN, K. & KÄSTNER, V. (2003) In *Archäometrie und Denkmalpflege - Kurzberichte 2003, Berlin*(Eds, HAHN, O., GOEDICKE, C., FUCHS, R. & HORN, I.), pp. 178-180.

- CRAMER, T. (2004): *Werksteine der Antike im Spannungsfeld von Geologie, Materialeigenschaften und Verwendung* – In: DOSTERT, A. & LANGE, F. (Hrsg.) *Mittel und Wege. Zur Bedeutung von Material und Technik in der Archäologie*, 219-244, Möhnesee (Bibliopolis).
- CRAMER, T., GERMANN, K. & KÄSTNER, V. (in press): *Provenance determination of marble from Pergamon in the Berlin Collection of Classical Antiquities - methods and results* – In: PRIKRYL, R. (Hrsg.) *Proceedings of International Conference Lux et Lapis 2002*, Valtice, Czech Republic, 25 p., Prague, Czech Republic
- DAHMS, E., GIESE, L. B., PEKDEGER, A. & NEUMANN, V. (1998): *Produktion und Reinjektion von Thermalfluiden im Geothermalkraftwerk Kizildere, W-Anatolien/ Türkei* – In: SCHRÖDER, J. H., HOLL, H. G. & BRUNSMANN, A. (Hrsg.) *Geowissenschaften in Ökonomie und Ökologie - Das System Erde - Programm und Zusammenfassungen der Tagungsbeiträge. Geo-Berlin '98*, Vol. 98-3, 27-28, Bonn (Alfred-Wegener-Stiftung).
- DAL PINO, R., NARDUCCI, P. & ROYER-CARFAGNI, G. (1999): *A SEM investigation on fatigue damage of marble* – *Journal of Materials Science Letters*, **18**(19): 1619-1622.
- DANIN, A. (1993): *Biogenic weathering of marble monuments in Didim, Turkey and in Trajan's Column, Rome* – In: ADIN, A., GASITH, A., FATTAL, B., GARTY, J., KANAREK, A. & STEINBERGER, Y. (Hrsg.) *Environmental quality and ecosystem stability; selected proceedings from the 5th international conference of the Israel Society for Ecology and Environmental Quality.*, Vol. 27, 7-8, 557-563, Oxford-New York (Pergamon).
- DE BAAR, H. J. W., SCHIJF, J. & BYRNE, R. H. (1991): *Solution chemistry of the rare earth elements in seawater* – *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.*, **28**: 357-373.
- DE BRESSER, J. H. P., TER HEEGE, J. H. & SPIERS, C. J. (2001): *Grain size reduction by dynamic recrystallization: can it result in major rheological weakening?* – *International Journal of Earth Sciences*, **90**(1): 28-45.
- DE LEO, F., URZI, C. & DE HOOG, G. S. (1999): *Two Coniosporium species from rock surfaces* – *Studies in Mycology*, (43): 70-79.
- DE VECCHI, G., LAZZARINI, L., LÜNEL, T., MIGNUCCI, A. & VISONÁ, D. (2000): *The genesis and characterisation of 'Marmor Misium' from Kozak (Turkey), a granite used in antiquity* – *Journal of Cultural Heritage*, **1**: 145-153.
- DE WALL, H., BESTMANN, M. & ULLEMAYER, K. (2000): *Anisotropy of diamagnetic susceptibility in Thasos marble: A comparison between measured and modeled data* – *Journal of Structural Geology*, **22**(11-12): 1761-1771.
- DEI, L., MAURO, M., BAGLIONI, P., DEL FA, C. M. & FRATINI, F. (1999): *Growth of crystal phases in porous media* – *Langmuir*, **15**(26): 8915-8922.
- DEPAOLO, D. J. & INGRAM, B. L. (1985): *High resolution stratigraphy with strontium isotopes* – *Science*, **227**: 938-941.
- DERMITZAKIS, M. & PAPANIKOLAOU, D. (1979): *The Molasse of Paros Island, Aegean Sea* – *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien*, **83**: 59-71.
- DIAKUMAKU, E. (1996): *Investigations on the role of black fungi and their pigments in the deterioration of monuments*, Oldenburg, 139 S.
- DIETRICH, R. V. & SKINNER, B. J. (1984): *Die Gesteine und ihre Mineralien*, Ott Verlag, Thun, 357 S.
- DINTER, D. A. (1998): *Late Cenozoic extension of the Alpine collisional orogen, northeastern Greece: Origin of the north Aegean basin* – *Geological Society of America Bulletin*, **110**(9): 1208-1226.
- DOEHNE, E. F. (1994): *The weathering of dolomite marble on Thasos, Greece*, Dissertation - University of California, 213 S.
- DÖRPFELD, W. (1910): *Die Arbeiten zu Pergamon 1908-1909* – *AM*, **35**.
- DRESEN, G., EVANS, B. & OLGAARD, D. L. (1998): *Effect of quartz inclusions on plastic flow in marble* – *Geophysical Research Letters*, **25**(8): 1245-1248.
- DREYFUS, R. & SCHRAUDOLPH, E. (1996): *Pergamon: The Telephos frieze from the Great Altar*, Fine Arts Museums of San Francisco, San Francisco, Calif.
- DUBERTRET, L. & KALAFATCIOGLU, A. (1973): *1:500000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritasi - Explanatory text of the geological map of Turkey - Izmir* – In: PAMIR, H. N. & ERENTÖZ, C. (Hrsg.) *Ankara (Maden Tektik ve Arama Enstitüsü Yayınlarından)*.
- DUERRAST, H., SIEGESMUND, S. & PRASAD, M. (1999): *Die Schadensanalyse von Naturwerksteinen mittels Ultraschalldiagnostik; Möglichkeiten und Grenzen* – In: VOSSMERBAEUMER, H. (Hrsg.) *Marmor-konservierung*, Vol. 150; 2, 359-374, Stuttgart (Ferdinand Enke).

- DULIU, O. G., DINESCU, L. C. & SKLIROS, D. (1999): *INAA study of the distribution of some major and trace elements in Greek limestones and marbles* – Journal of Trace and Microprobe Techniques, **17**(2): 165-175.
- DÜRR, S. (1975): *Über Alter und geotektonische Stellung des Menderes-Kristallins/ SW-Anatolien und seine Äquivalente in der mittleren Ägäis*, Habilitationsschrift Universität, Marburg/Lahn, 107 S.
- DÜRR, S. (1976): *Über das Menderes-Kristallin und seine Äquivalente in Griechenland* – Bulletin de la Société Géologique de France, **18**(2): 429.
- DÜRR, S., ALTHERR, R., KELLER, J., OKRUSCH, M. & SEIDEL, E. (1978): *The Median Aegean Crystalline Belt: Stratigraphy, structure, metamorphism, magmatism* – In: CLOSS, H., ROEDER, D. & SCHMIDT, K. (Hrsg.) Alps, Apennines, Hellenides, 455-477, Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- EILERT, E. (1978): *Geologischer Rahmen und petrographische Merkmale von Marmoren Ostthessaliens (Schwerpunkt mittelthessalische Schwelle)*, Diplomarbeit, Freie Universität, Berlin, 149 S.
- ELDERFIELD, H., GIESKES, J. M., BAKER, P. A., OLDFIELD, R. K., HAWKESWORTH, C. J. & MILLER, R. (1982): *$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios, interstitial water chemistry and diagenesis in deep-sea carbonate sediments of the Ontong Java Plateau* – Geochimica et Cosmochimica Acta, **46**: 2259-2268.
- ERDOGAN, B. & GÜNGÖR, T. (1992): *Stratigraphy and tectonic evolution of the northern margin of the Menderes Massif* – Turk Assoc Petrol Geol Bull, **4**(1): 9-32.
- ERDOGAN, M. (2000): *Measurement of polished rock surface brightness by image analysis method* – Engineering Geology, **57**(1-2): 65-72.
- EVSTRAPOV, A. A., KUROCHKIN, V. E. & PANINA, L. K. (1998): *Using reflective spectrophotometry to determine the biodegradation of monuments made from marble* – Journal of Optical Technology, **65**(5): 350-353.
- FABRICIUS, E. (1884): *Antike Steinbrüche am Kataruga-Hang* – AM, **9**(Taf. VII, in: Kienast, 1992).
- FANT, J. C. (1989): *Cavum antrum Phrygiae: the organization and operations of the Roman imperial marble quarries in Phrygia*, B.A.R., Oxford, England, x, 268 S.
- FARVER, J. R. & YUND, R. A. (1998): *Oxygen grain boundary diffusion in natural and hot-pressed calcite aggregates* – Earth and Planetary Science Letters, **161**(1-4): 189-200.
- FAURE, G. (1986): *Principles of Isotope Geology*, New York.
- FEENSTRA, A. & WUNDER, B. (2002): *Dehydration of diasporite to corundite in nature and experiment* – Geology, **30**(2): 119-122.
- FEENSTRA, A., OCKENGA, E., RHEDE, D. & WIEDENBECK, M. (2003): *Li-rich zincostauriolite and its decomposition-related breakdown products in a diasporite-bearing metabauxite from East Samos (Greece); an EMP and SIMS study* – American Mineralogist, **88**(5-6): 789-805.
- FERRILL, D. A. (1998): *Critical re-evaluation of differential stress estimates from calcite twins in coarse-grained limestone* – Tectonophysics, **285**(1-2): 77-86.
- FILGIS, M. N. & RADT, W. (1986): *Die Stadtgrabung Teil I: Das Heroon* – Altertümer von Pergamon, **XV**(1).
- FIorentini, E. & HOERNES, S. (1994): *Ein Zwei-Methoden-Ansatz zur Herkunftsbestimmung, Analyse der Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopengehalte und Kathodolumineszenzuntersuchungen der Marmore aus Mahdia* – In: SALIES, G. H. (Hrsg.) Das Wrack - Der antike Schiffsfund von Mahdia im Rheinischen Landesmuseum Bonn, 1091-1104, Köln
- FISCHER, M., PEARL, Z. & GROSSMARK, T. (1998): *Marble studies: Roman Palestine and the marble trade*, UVK Universitätsverlag Konstanz, Konstanz, 323 S.
- FISCHER, M. L. (2003): *Marble from Pentelikon, Paros, Thasos and Proconnesus in ancient Israel: An attempt at chronological distinctions* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- FLOREN, J. (1987): *Die geometrische und archaische Plastik* – In: FUCHS, W. & HAUSMANN, U. (Hrsg.) Die griechische Plastik, Bd. I, München (Beck).
- FOCKENBERG, T., WUNDER, B., GREVEL, K.-D. & BURCHARD, M. (1996): *The equilibrium of diasporite-corundum at high pressures* – European Journal of Mineralogy, **8**: 1293-1299.
- FRANZINI, M. (1995): *Stones in monuments: natural and anthropogenic deterioration of marble artifacts* – European Journal of Mineralogy, **7**: 735-743.
- FUCHS, K. (1997): *Natursteine aus aller Welt*, Callwey-Verlag, München.

- GAGGADIS-ROBIN, V., SINTÈS, C., KAVOUSSANAKI, D., DOTSIKA, E. & MANIATIS, Y. (2003): *Provenance investigation of some marble sarcophagi from Arles with stable isotope and maximum grain size analyses* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- GAIED, M. E., BEN, H. A. M., CHAABANI, F. & TAAMALLAH, M. N. (2000): *Les potentialités en pierres marbrières et ornementales de Tunisie* – In: GAIED MOHAMED, E., BEN HAJ ALI, M., CHAABANI, F., ZAGRARNI MOHAMED, F. & TAAMALLAH MOHAMED, N. (Hrsg.) *Les Pierres marbrières de Tunisie* (Service Géologique de Tunisie. Tunis, Tunisia. 2000.).
- GALANOS, A. & DOGANIS, Y. (2003): *The remnants of the epidermis on the Parthenon - A valuable analytical tool for assessing condition* – *Studies in Conservation*, **48**(1): 3-16.
- GALETTI, G., LAZZARINI, L. & MAGGETTI, M. (1992): *A first characterisation of the most important granites used in antiquity* – In: WAELKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period, 167-177*, Leuven (Leuven University Press).
- GARCIA, V. M., URZI, C. & VENDRELL, S. M. (2002): *Weathering processes on the rock surface in natural outcrops; the case of an ancient marble quarry (Belevi, Turkey)* – *Environmental Geology* (Berlin), **41**(8): 889-897.
- GAST, R. (1976): *Geologischer Rahmen und geochemische Merkmale von Marmoren Ost-Thessaliens (Schwerpunkt Ossa-Gebirge). Eine Untersuchung zur Herkunftsbestimmung von Marmoren hellenistischer Grabstelen*, Diplomarbeit, Freie Universität, Berlin, 78 S.
- GAST, R., GERMANN, K. & EILERT, E. (1979): *Petrographische und geochemische Untersuchungen zur Herkunftsbestimmung von Marmoren hellenistischer Grabstellen Thessaliens* – In: *La Thessalie - Actes de la Table-Ronde 21-24 Juillet 1975*, Vol. 6 Lyon (Maison de l'Orient Méditerranéen).
- GAUTIER, P., BALLEVRE, M., BRUN, J. P. & JOLIVET, L. (1990): *Extension ductile et bassins sédimentaires mio-pliocènes dans les Cyclades (îles de Naxos et Paros)* – *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, **310**(2): 147-153.
- GENC, S. C. (2004): *A Triassic large igneous province in the Pontides, northern Turkey: geochemical data for its tectonic setting* – *Journal of Asian Earth Sciences*, **22**(5): 503-516.
- GEORGALAS, G. (1924): *Sur la constitution géologique des îles Phourni (entre Nikaria et Samos)* – *C.R. Acad. Sci., Paris*, **179**: 601-604.
- GERKAN, A. V. (1921): *Das Theater von Priene, als Einzelanlage und in seiner Bedeutung für das hellenistische Bühnenwesen*, F. Schmidt, München-Berlin, 132 S.
- GERKAN, A. V. (1929): *Der Altar des Artemis-Tempels in Magnesia am Mäander* – *Studien zur Bauforschung - Berlin*, **1**: 35.
- GERMANN, K., HOLZMANN, G. & WINKLER, F. J. (1980): *Determination of Marble Provenance: Limits of Isotopic Analysis* – *Archaeometry*, **22**(1): 99-106.
- GERMANN, K. (1981): *Lagerstätteneigenschaften und herkunftstypische Merkmalsmuster von Marmoren am Südweststrand des Menderes-Massivs (Südwestanatolien)* – *Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts*, **96**: 214-235.
- GERMANN, K. & KNOLL, H. (1987): *Untersuchungen an Marmoren der Kykladen, Abschlußbericht zu einem von der Stiftung Volkswagenwerk geförderten Forschungsprojekt (Az. I/36577 v. 17.10. 1980)*, Berlin, 41 S.
- GERMANN, K., GRUBEN, G., KNOLL, H., VALIS, V. & WINKLER, F. J. (1988): *Provenance characteristics of Cycladic (Paros and Naxos) marbles - a multivariate geological approach* – In: HERZ, N. & WAELKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble: geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 251-262, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- GERMANN, K. & CRAMER, T. (in press): *Methoden der Herkunftsbestimmung für Naturwerksteine - das Beispiel des Marmors* – In: SIEGESMUND, S. & AURAS, M. (Hrsg.) *Umwelt-Natur-Denkmal* (Deutsche Umweltstiftung - Edition Leipzig).
- GESSNER, K. (2000): *Eocene nappe tectonics and late-Alpine extension in the central Anatolide belt, western Turkey - structure, kinematics and deformation history*, Dissertation Johannes Gutenberg-Universität, Mainz.

- GESSNER, K., RING, U., PASSCHIER, C. W. & HETZEL, R. (2002): *Discussion on "Stratigraphic and metamorphic inversions in the central Menderes Massif: a new structural model", by Aral I. Okay* – International Journal of Earth Sciences, **91**: 168-172.
- GESTRI, L. (1976): *Capitalismo e classe operaia in provincia di Massa-Carrara : dall'unità d'Italia all'età giolittiana*, L. S. Olschki, Firenze, 371 S.
- GIAMMATTEO, M., CIPRIANI, N., CORONA, L., MAGALDI, D. & PANTALEONI, G. (1997): *Osservazioni sull'origine e la composizione chimico-mineralogica delle "terre sigillate" dell'Isola di Samo* – Mineralogica et Petrographica Acta, **40**: 327-337.
- GNOLI, R. (1988): *Marmora romana*, Edizioni dell'Elefante, Roma, 289 S.
- GNOLI, R. (1997): *Marmi antichi* – In: BORGHINI, G. (Hrsg.) *Marmi antichi*, Roma
- GNOLI, R. & BORGHINI, G. (1998): *Marmi antichi*, De Luca, Roma, 342 S.
- GOETTE, H. R., POLIKRETI, K., VACOULIS, T. & MANIATIS, Y. (1999): *Investigation of the greyish-blue marble of Pentelikon and Hymettus* – In: SCHVOERER, M. (Hrsg.) *Actes de la Conférence Internationale ASMOSIA IV, 9-13 Octobre 1995, Archéomatériaux – Marbres et Autres Roches*, 83-90, Bordeaux
- GOKTEN, E., HAVZOGLU, T. & SAN, Ö. (2001): *Tertiary evolution of the central Menderes Massif based on structural investigations of metamorphics and sedimentary cover rocks between Salihli and Kiraz (western Turkey)* – International Journal of Earth Sciences, **89**(4): 745-756.
- GOLDSMITH, J. R. & NEWTON, R. C. (1969): *P-T-X-relations in the system CaCO₃-MgCO₃ at high temperatures and pressures* – American Journal of Science, **267**: 160-190-457.
- GOMEZ-HERAS, M., DE BUERGO, M. A., REBOLLAR, E., OUJJA, M., CASTILLEJO, M. & FORT, R. (2003): *Laser removal of water repellent treatments on limestone* – Applied Surface Science, **219**(3-4): 290-299.
- GOODCHILD JOHN, E. & WOOD, J. T. (1889): *A study of the Halicarnassian marbles in the British Museum : with reference to the restorations of the Tomb of Mausolus by the late Professor C.R. Cockerell*, Printed by Phelp Brothers, Walthamstow.
- GORBUSHINA, A. (2003): *Microcolonial fungi: Survival potential of terrestrial vegetative structures* – Astrobiology, **3**(3): 543-554.
- GORGONI, C., KOKKINAKIS, I., LAZZARINI, L. & MARIOTTINI, M. (1992): *Geochemical and petrographic characterisation of rosso antico and other white-grey marbles of Mani (Greece)*. – In: WAELEKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period, 155-165*, Leuven, Belgium (Leuven University Press).
- GORGONI, C. & PALLANTE, P. (2000): *A reassessment of archaeometric data for Proconnesian marble based on quarry samples and artifacts, and the definitions of its quarrying chronology during the Roman Imperial Period* – In: ASMOSIA VI abstracts Venice
- GORGONI, C., LAZZARINI, L., PALLANTE, P. & TURI, B. (2002): *An updated and detailed mineropetrographic and C-O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity* – In: HERRMANN, J., HERZ, N. & NEWMAN, R. (Hrsg.) *ASMOSIA 5, Interdisciplinary Studies on Ancient Stone – Proceedings of the Fifth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Museum of Fine Arts, Boston, June 1998, 110-131*, London (Archetype Publications).
- GOTTSCHALK, M. & METZ, P. (1992): *The system calcite-dolomite: a model to calculate the Gibbs free energy of mixing on the basis of existing experimental data* – Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen, **164**: 29-55.
- GRAEDEL, T. E. (2000): *Mechanisms for the atmospheric corrosion of carbonate stone* – Journal of the Electrochemical Society, **147**(3): 1006-1009.
- GRAHAM, C. M., VALLEY, J. W., EILER, J. M. & WADA, H. (1998): *Timescales and mechanisms of fluid infiltration in a marble: an ion microprobe study* – Contributions to Mineralogy and Petrology, **132**(4): 371-389.
- GREEN, W. A., YOUNG, S. M. M., VAN DER MERWE, N. & HERRMANN, J. J. J. (2002): *Source tracing marble: trace element analysis with inductively coupled plasma-mass spectrometry* – In: HERRMANN, J., HERZ, N. & NEWMAN, R. (Hrsg.) *ASMOSIA 5, Interdisciplinary Studies on Ancient Stone – Proceedings of the Fifth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Museum of Fine Arts, Boston, June 1998, 132-142*, London (Archetype Publications).

- GREENWOOD, N. N. & EARNSHAW, A. (1999): *Chemie der Elemente*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Basel, 1707 S.
- GRIMANIS, A. P. & VASSILAKI-GRIMANI, M. (1988): *Provenance studies of Greek marbles by Instrumental Neutron Activation Analysis* – In: HERZ, N. & WAELKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble : geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 275-281, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- GRUBEN, G. (1963): *Das archaische Didymaion* – JdI, **78**: 78-177.
- GULIY, V. N. & WADA, H. (2003): *Macro- and microvariations in the carbon and oxygen isotopic composition of precambrian carbonates from the Aldan Shield* – *Geochemistry International*, **41**(5): 431-439.
- GÜNGÖR, T. & ERDOĞAN, B. (2001): *Emplacement age and direction of the Lycian nappes in the Söke-Selçuk region, western Turkey* – *International Journal of Earth Sciences*, **89**: 874-882.
- GÜNGÖR, T. & ERDOĞAN, B. (2002): *Tectonic significance of mafic volcanic rocks in a Mesozoic sequence of the Menderes Massif, West Turkey* – *International Journal of Earth Sciences*, **91**: 386-397.
- HAFI, A. A. (1996): *Herkunft, Gefüge und paläogeographische Position der Bauxite/ Laterite in Böotien, Griechenland* – *Nachrichten - Deutsche Geologische Gesellschaft*, **56**(1): 69-70.
- HAHN, W. P. (1966): *Die isotopische Verteilung von Kohlenstoff und Schwefel in Marmor und anderen Metamorphiten* – *Geologische Rundschau*, **55**(1): 197-209.
- HAI, A. A. (1994): *Herkunft, Gefüge und paläogeographische Position der Bauxite/ Laterite in Böotien, Griechenland*, Universität Köln, 102 S.
- HAMIAUX, M. (1988): *Les éléments d'architecture de Magnésie du Méandre conservés au Musée du Louvre* – RA, (Fasc. 1): 83-108.
- HAMILTON, W. J. (1842): *Researches in Asia Minor, Pontus and Armenia, with some account of their antiquities and geology*, Murray, London.
- HAMPTON, C. (2003): *Investigating the bowing mechanism of Carrara marble facades*, Dissertation - Department of Physics, University of Bristol, Bristol.
- HARKER, R. I. & TUTTLE, O. F. (1955): *Studies in the system CaO-MgO-CO₂: Limits of solid solution along the binary join CaCO₃-MgCO₃* – *American Journal of Science*, **253**: 274-282.
- HAYATSU, A., YORK, D., FARQUHAR, R. M. & GITTINGS, J. (1965): *Significance of strontium isotope ratios in theories of carbonatite genesis* – *Nature (London)*, **207**(4997): 625-626.
- HECHT, J. (1972): *Zur Geologie von Südost-Lesbos (Griechenland)* – *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, **123**(2): 423-432.
- HECHT, L., FREIBERGER, R., GILG, H. A., GRUNDMANN, G. & KOSTITSYN, Y. A. (1999): *Rare earth element and isotope (C, O, Sr) characteristics of hydrothermal carbonates: genetic implications for dolomite-hosted talc mineralization at Göpfersgrün (Fichtelgebirge, Germany)* – *Chemical Geology*, **155**(1-2): 115-130.
- HEILBRONNER, R., PANOZZO, R. & PAULI, C. (1993): *Integrated spatial and orientation analysis of quartz c-axis by computer-aided microscopy* – *Journal of Structural Geology*, **15**: 369-382.
- HEILMEYER, W.-D. (Hrsg.) (1997): *Der Pergamonaltar - Die neue Präsentation nach Restaurierung des Telephosfrieses*, - Wasmuth, Tübingen etc., 201 S.
- HEILMEYER, W.-D., HERES, H. & KÄSTNER, V. (2004): *Der Pergamonaltar*, Philipp von Zabern, Mainz.
- HELLNER, N. (2002): *Die Säulenbasen des zweiten Dipteros von Samos*, Dissertation, TU München.
- HENCHMAN, M. J. (1999): *Linking sculpture to geology isotopic abundances as a key to provenance* – In: Geological Society of America, 1999 annual meeting., Vol. 31; 7, 82, Boulder, CO, United States (Geological Society of America (GSA)).
- HENDERSON, P. (1996): *The rare earth elements: introduction and review* – In: JONES, A. P., WALL, F. & WILLIAMS, C. T. (Hrsg.) *Rare Earth Minerals - Chemistry, origin and ore deposits*, 1-19, London (Chapman & Hall).
- HENON, F. E., CARBONELL, R. G. & DESIMONE, J. M. (2002): *Effect of polymer coatings from CO₂ on water-vapor transport in porous media* – *Aiche Journal*, **48**(5): 941-952.
- HENRY, D. J. & DUTROW, B. L. (2001): *Compositional zoning and element partitioning in nickeloan tourmaline from a metamorphosed karstbauxite from Samos, Greece* – *American Mineralogist*, **86**(10): 1130-1142.
- HEREFORD, R., THOMPSON, K. S. & BURKE, K. J. (1998): *Numerical ages of Holocene tributary debris fans inferred from dissolution pitting on carbonate boulders in the Grand Canyon of Arizona* – *Quaternary Research*, **50**(2): 139-147.
- HERES, H. (1996): *Von Fall zu Fall entscheiden! Zu den Restaurierungen von Marmorskulpturen in der Antikensammlung 1995/96* – *Jahrbuch der Berliner Museen*, **38**: 185-194.

- HERKENRATH, E. (1902): *Der Fries des Artemisions von Magnesia a. M.*, Berlin, 51 S.
- HERRMANN, J. J. J. & BARBIN, V. (1993): *The Exportation of Marble from the Aliki Quarries on Thasos: Cathodoluminescence of Samples from Turkey and Italy* – American Journal of Archaeology, **97**: 91-103.
- HERRMANN JR., J. J. & NEWMAN, R. (1995): *The exportation of dolomitic sculptural marble from Thassos: evidence from Mediterranean and other collections* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) *The Study of Marble and Other Stones Used in Antiquity*, 73-86, London (Archetype Publications).
- HERZ, N. & PRITCHETT, W. K. (1953): *Marble in Attic epigraphy* – American Journal of Archaeology, **57**(2): 71-83.
- HERZ, N. & WENNER, D. B. (1978): *Assembly of Greek marble inscriptions by isotopic methods* – Science, **199**(4333): 1070-1072.
- HERZ, N., MOSE, D. G. & WENNER, D. B. (1982): *$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios: a possible discriminant for classical marble provenance* – Geological Society of America, Abstracts with Program, **14**: 514.
- HERZ, N. (1985): *Isotopic analysis of marble* – In: RAPP, G., JR. & GIFFORD JOHN, A. (Hrsg.) *Archaeological Geology*, 331-351, New Haven, CT, United States (Yale Univ. Press).
- HERZ, N. & DEAN, N. E. (1986): *Stable isotopes and archaeological geology: the Carrara marble* – Applied Geochemistry, **1**: 139-151.
- HERZ, N. (1987): *Carbon and oxygen isotopic ratios: a data base for classical Greek and Roman Marble* – Archaeometry, **29**: 35-43.
- HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) (1988): *Classical marble: geochemistry, technology, trade*, - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, 482 S.
- HERZ, N. (1992): *Provenance determination of neolithic to classical Mediterranean marbles by stable isotopes* – Archaeometry, **34**(2): 185-194.
- HESS, J., BENDER, M. L. & SCHILLING, J. G. (1986): *Evolution of the ratio of strontium 87 to strontium 86 in seawater from Cretaceous to present* – Science, **231**: 979-984.
- HIGGINS, M. D. & HIGGINS, R. (1996): *A geological companion to Greece and the Aegean*, Duckworth, London.
- HILGENFELDT, K. (2000): *Diagenetic Dissolution of Biogenic Magnetite in Surface Sediments of the Benguela Upwelling System* – International Journal of Earth Sciences, **88**(4): 630-640.
- HILLER VON GAERTRINGEN, F., FREDRICH, C. J., PROTT, H. T. A. V., SCHRADER, H., WIEGAND, T. & WINNEFELD, H. (1906): *Inschriften von Priene*, G. Reimer, Berlin, 312 S.
- HILLS, P. (1999): *Venetian colour : marble, mosaic, painting and glass, 1250-1550*, Yale University Press, New Haven, CT, 247 S.
- HOIGARD, K. (Hrsg.) (2000): *Dimension stone cladding: design, construction, evaluation, and repair*, - ASTM, West Conshohocken, PA, 184 S.
- HOKE, G. D. & TURCOTTE, D. L. (2004): *The weathering of stones due to dissolution* – Environmental Geology, (eFIRST).
- HÜLSEN, J. (1919): *Das Nymphaeum*, Königliche Museen zu Berlin. Walter de Gruyter & Co., Berlin, Leipzig.
- ICONS (2000): *ICONS 2000 - Interactive Catalogue of Natural Stones*. 2 CDs, Variograma, Lisboa.
- IKE, K. & OTAKI, T. (1998): *Natural lighting method of the Parthenon: an experimental study for transparency of Pentelic marble tile*, [Architectural Institute of Japan], [s.l.], [9] p. S.
- IVANKINA, T. I., NIKITIN, A. N., TELEPNEV, A. S., ULLEMEYER, K., EFIMOVA, G. A., KIREENKOVA, S. M., SOBOLEV, G. A., SUKHOPAROV, V. A. & WALTHER, K. (2001): *The effect of temperature and long-term mechanical stresses on the deformational, thermal, and textural characteristics of marble* – Izvestiya - Russian Academy of Sciences. Physics of the Solid Earth, **37**(1): 46-58.
- JACOBSHAGEN, V. (1986): *Geologie von Griechenland*, Gebr. Borntraeger, Berlin, 363 S.
- JEPPESEN, K. (2002): *The superstructure - A comparative analysis of the architectural, sculptural, and literary evidence* – In: *The Maussoleion at Halicarnassos - Reports of the Danish Archaeological Expedition to Bodrum*, Vol. XV:5 (Jutland Archaeological Society Publications).
- JONES, A. P., WALL, F. & WILLIAMS, C. T. (Hrsg.) (1996): *Rare Earth Elements - Chemistry, origin and ore deposits*, - Mineralogical Society Series, 7, Chapman & Hall, London, 372 S.
- JONGSTE, P. F. B., JANSEN, J. B., MOENS, L., DE PAEPE, P. & WAELEKENS, M. (1992): *The use of marble in Latium between 70 and 150 A.D.. ICPAES for determination of the provenance of white marbles* – In: WAELEKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones : quarrying, trade and prove-*

- nance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period, 263-267, Leuven, Belgium (Leuven University Press).
- JONGSTE, P. F. B., JANSEN, J. B., MOENS, L. & DE PAEPE, P. (1995): *A multivariate provenance determination of white marbles using ICPAES and stable isotope analysis* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) *The Study of Marble and Other Stones Used in Antiquity*, 143-149, London (Archetype Publications).
- JOUKOWSKY, M. S. (1986): *Prehistoric Aphrodisias*, vols. I-II, Louvain, Rhode Island.
- KARUL, K. (1988): *Geothermal activity in Turkey* – In: BARBIER, E., DICKSON, M. H. & FANELLI, M. (Hrsg.) *Small geothermal resources; Part 2, Geothermal projects in developing countries.*, Vol. 17; 2/3, 557-564, Oxford - New York, International (Pergamon Press).
- KÄSTNER, V. (1996): *Tradition oder Innovation. Besondere Kapitellformen in der hellenistischen Baukunst von Pergamon* – Säule und Gebälk, **DiskAB(6)**: 154f.
- KATSANOS, N. A., DE SANTIS, F., CORDOBA, A., ROUBANI-KALANTZOPOULOU, F. & PASELLA, D. (1999): *Corrosive effects from the deposition of gaseous pollutants on surfaces of cultural and artistic value inside museums* – *Journal of Hazardous Materials*, **64(1)**: 21-36.
- KATZIR, Y. & VALLEY, J. W. (2001): *Calcite-corundum oxygen isotope fractionations in Naxos metabauxites: selecting samples for thermometry* – In: Geological Society of America, 2001 annual meeting. (Geological Society of America (GSA). Boulder, CO, United States).
- KAWERAU, G. & REHM, A. (1914): *Das Delphinion in Milet*, G. Reimer, Berlin, 318 S.
- KIENAST, H. J. (1990): *Die Wasserleitung des Eupalinos auf Samos* – In: *Wasser Berlin '89; Kongreßvorträge*, 94-104, Berlin (Erich Schmidt).
- KIENAST, H. J. (1992): *Topographische Studien im Heraion von Samos* – *Archäologischer Anzeiger*: 171-213.
- KIENAST, H. J. (1995): *Die Wasserleitung des Eupalinos auf Samos*, In Kommission bei R. Habelt, Bonn, 215 S.
- KIM, S. T., MAEDA, Y. & TSUJINO, Y. (2004): *Assessment of the effect of air pollution on material damages in Northeast Asia* – *Atmospheric Environment*, **38(1)**: 37-48.
- KITCHEN, N. E. & VALLEY, J. W. (1995): *Carbon isotope thermometry in marbles of the Adirondack mountains, New York* – *Journal of Metamorphic Geology*, **13**: 577-594.
- KLAPISCH-ZUBER, C. (1969): *Les Maitres du marbre, Carrare, 1300-1600*, S.E.V.P.E.N., Paris, 365 S.
- KLEIN, S., FEKRSANATI, F., HILDENHAGEN, J., DICKMANN, K., UPHOFF, H., MARAKIS, Y. & ZAFIROPOULOS, V. (2001): *Discoloration of marble during laser cleaning by Nd : YAG laser wavelengths* – *Applied Surface Science*, **171(3-4)**: 242-251.
- KNACKFUSS, H. (1941): *Didyma I. Teil: Die Baubeschreibung* – In: WIEGAND, T. (Hrsg.)
- KNITTMAYER, B. & HEILMEYER, W.-D. (Hrsg.) (1998a): *Die Antikensammlung: Altes Museum*, - Nr. 139, Pergamonmuseum/Staatliche Museen zu Berlin.
- KNITTMAYER, B. & HEILMEYER, W.-D. (Hrsg.) (1998b): *Die Antikensammlung: Altes Museum*, - Nr. 137, Pergamonmuseum/Staatliche Museen zu Berlin.
- KNOWLES, K., LEWIS, F. & PEACOCK, D. (2003): *Stone in archaeology: towards a digital resource* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- KOCH, A. & SIEGESMUND, S. (2004): *The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble* – *Environmental Geology*, (eFirst).
- KOCH-MOECK, M. (2004): *Computergestützte geowissenschaftliche Entscheidungshilfen bei Planung und Optimierung der untertägigen Gewinnung von Marmor*, Dissertation TU Berlin, Berlin.
- KOEHNE, F. (1937): *Petrographie und Geologie der Fourni-Inseln bei Samos* – *N. Jb. Miner.*, **34(2)**: 1-78.
- KOENIGS, W. (1980): *Bauglieder aus Milet II (Milet 1978-1979)* – *Istanbuler Mitteilungen*, **39**: 56-91.
- KOENIGS, W. (1983): *Der Athenatempel von Priene, Bericht über die 1977-82 durchgeführten Untersuchungen* – *Istanbuler Mitteilungen*, **33**: 134-176.
- KOHN, J., HUMANN, C. & WATZINGER, C. (1904): *Magnesia am Mäander: Bericht über die Ergebnisse der Ausgrabungen der Jahre 1891-1893 von Carl Humann*, Reimer, Berlin, 228 S.
- KOLLER, K. (2000): *Ja, nicht stumm ist das Bild - Festschrift Friedrich Brein* – *Forum Archaeologiae - Zeitschrift für klassische Archäologie*, **14(3)**: aus <http://mailbox.univie.ac.at/elisabeth.trinkl/forum/forum0300/14koller.htm>, eingesehen: 17.5.2001.

- KOLLER, K. (2003): *The use of coloured stones within marble décors of Terrace House 2 in Ephesos* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- KOLLER, K., DE PAEPE, P. & MOENS, L. (2003): *The Ephesian marble quarries. Topography, analysis, conclusions* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- KORALAY, O. E., SATIR, M. & DORA, O. O. (2001): *Geochemical and geochronological evidence for Early Triassic calc-alkaline magmatism in the Menderes Massif, western Turkey* – International Journal of Earth Sciences, **89**: 822-835.
- KORRES, M. (1984): *Vorfertigung und Ferntransport eines athenischen Großbaus und zur Proportionierung von Säulen in der hellenistischen Architektur, Bauplanung und Bautheorie der Antike* – DiskAB, **4**: 201-207.
- KORRES, M. (1995): *From Pentelicon to the Parthenon : the ancient quarries and the story of a half-worked column capital of the first marble Parthenon*, Melissa, Athens, 128 S.
- KORRES, M. (2000): *Stones of the Parthenon*, J. Paul Getty Museum, Los Angeles, 69 S.
- KOZELJ, T. & WURCH-KOZELJ, M. (1992): *The military Protection of the Quarries of the Aliko Area during the Byzantine Period* – In: WAELKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period, 43-57, Leuven (Leuven University Press).
- KOZELJ, T. & WURCH-KOZELJ, M. (1995): *Dragon-Houses of Southern Euboea - Military Guard-Places of the Quarries* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) The Study of Marble and Other Stones Used in Antiquity, 17-31, London (Archetype Publications).
- KREULEN, R. (1988): *High integrated fluid/rock ratios during metamorphism at Naxos: evidence from carbon isotopes of calcite in schists and fluid inclusions* – Contributions to Mineralogy and Petrology, **98**: 28-32.
- KRITSOTAKIS, K., PERDIKATIS, V. & LASKARIDIS, K. (2003): *An attempt for Greek marble discrimination based on trace- and isotope- analyses combined with mineralogical and petrographical analysis* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- KUNZE, M. (1992): *Der Pergamonaltar. Seine Geschichte, Entdeckung und Rekonstruktion*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 50 S.
- LAMENTI, G., TIANO, P. & TOMASELLI, L. (2000): *Biodeterioration of ornamental marble statues in the Boboli Gardens (Florence, Italy)* – Journal of Applied Phycology, **12**(3-5): 427-433.
- LANGELLA, A., CAPPELLETTI, P. & DE GENNARO, M. (2001): *Zeolites in closed hydrologic systems -Natural zeolites: occurrence, properties, applications* – Reviews in Mineralogy and Geochemistry, **45**: 235-260.
- LAPPARENT, J. D. (1937): *L'emi de Samos* – Miner. u. Petrog. Mitt., **49**(1): 1-30.
- LAPUENTE, P. M., TURI, B. & BLANC, P. (2000): *Marbles from Roman Hispania: stable isotope and cathodoluminescence characterization* – Applied Geochemistry, **15**(10): 1469-1493.
- LAPUENTE, P. M., TURI, B. & BLANC, P. (2003): *Marbles and coloured stones from the theatre of Caesaraugusta (Hispania)* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- LASKARIDIS, K. & PAPAIOANNOU, N. (2001): *Choice of marble based on its physico-mechanical properties* – In: VARTI MATARANGAS, M. (Hrsg.) The building stone in monuments., 211-223, (Institute of Geology and Mineral Exploration. Athens, Greece. 2001.).
- LAZIC, V., FANTONI, R., COLAO, F., SANTAGATA, A., MORONE, A. & SPIZZICHINO, V. (2004): *Quantitative laser induced breakdown spectroscopy analysis of ancient marbles and corrections for the variability of plasma parameters and of ablation rate* – Journal of Analytical Atomic Spectrometry, **19**(4): 429-436.
- LAZZARINI, L., MOSCHINI, G. & STIEVANO, A. M. (1980a): *A contribution to the identification of Italian, Greek and Anatolian marbles through a petrographical study and the evaluation of the Ca/Sr ratio* – Archaeometry, **22**(2): 173-183.
- LAZZARINI, L., MOSCHINI, G. & STIEVANO, B. M. (1980b): *A contribution to the identification of Italian, Greek and Anatolian marbles through a petrographical study and the evaluation of the Ca/Sr ratio* +

- LAZZARINI, L. & MARIOTTINI, M. (1987): *La provenienza dei marmi cristallini usati in antico: un nuovo contributo al problema del rapporto calcite/dolomite* – In: Estratto da "Materiali Lapidari", Supplemento al n. 41/1987 del "Bolletino d'Arte" del Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, 69-72, (Istituto poligrafico e Zecca dello Stato).
- LAZZARINI, L. (1994): *Lapis sarcophagus: an historical and scientific note* – In: Contributi del Centro Linceo Interdisciplinare 'Beniamino Segre' N.88 - Conservazione del patrimonio culturale, 103-116, Roma (Accademia Nazionale dei Lincei).
- LAZZARINI, L., PENSABENE, P. & TURI, B. (1999): *Isotopic and petrographic characterization of Marmor Lesbium, Island of Lesbos, Greece* – In: SCHVOERER, M. (Hrsg.) Actes de la Conférence Internationale ASMOSIA IV, 9-13 Octobre 1995, *Archéomatériaux – Marbres et Autres Roches*, 125-129, Bordeaux
- LAZZARINI, L. & CANCELLIERE, S. (2000): *Characterisation of the white marble of two unpublished Roman quarries on the Islands of Fourni and Skyros (Greece)* – Periodico di Mineralogia, **69**(1): 49-62.
- LAZZARINI, L., PONTI, G., PREITE MARTINEZ, M., ROCKWELL, P. & TURI, B. (2002): *Historical, technical, petrographic, and isotopic features of Aphrodisian marble* – In: HERRMANN, J., HERZ, N. & NEWMAN, R. (Hrsg.) ASMOSIA 5, Interdisciplinary Studies on Ancient Stone – Proceedings of the Fifth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Museum of Fine Arts, Boston, June 1998, 163-168, London (Archetype Publications).
- LAZZARINI, L. (2003) In *4th Symposium on Archaeometry of the Hellenistic Society of Archaeometry, 28-31 May 2003 - Abstracts Athens*.
- LAZZARINI, L. & ANTONELLI, F. (2003): *Petrographic and isotopic characterization of the marble of the island of Tinos (Greece)* – Archaeometry, **45**: 541-552.
- LE BAS, M. J., SUBBARAO, K. V. & WALSH, J. N. (2002): *Metacarbonatite or marble? - the case of the carbonate, pyroxenite, calcite-apatite rock complex at Borra, Eastern Ghats, India* – Journal of Asian Earth Sciences, **20**(2): 127-140.
- LEE, J. M. & WATKINS, K. G. (2000): *In-process monitoring techniques for laser cleaning* – Optics and Lasers in Engineering, **34**(4-6): 429-442.
- LEE, J. M., WATKINS, K. G. & STEEN, W. M. (2001): *In-process chromatic monitoring in the laser cleaning of marble* – Journal of Laser Applications, **13**(1): 19-25.
- LEISS, B. & MOLLI, G. (2003): *'High-temperature' texture in naturally deformed Carrara Marble from the Alpi Apuane, Italy* – Journal of Structural Geology, **25**(4): 649-658.
- LEIVICK, J. (1999): *Carrara : the marble quarries of Tuscany*, Stanford University Press, Stanford, CA, 74 S.
- LEPSIUS, R. (1891): *Griechische Marmorstudien*, Abhandlungen Königl. Akademie der Wissenschaften, Phil.-Hist. Kl. 1890, Berlin, 135 S.
- LEPSIUS, R. (1893): *Geologie von Attika : Ein Beitrag zur Lehre vom Metamorphismus der Gesteine*, D. Reimer, Berlin, 196 S.
- LESSER, F. C. (1752): *Nachrichtliche Beschreibung des Ohnweit des Berg-Schlusses Straussberg in dem Hochfürst. Schwarzburgl. Rudolftädtischen Amte gleiches Nahmens neu entdeckten Muschel-Marmors, welcher zugleich mit andern Marmor-Arthen in Vergleichung gezogen wird*, J.A. Cöler, Nordhausen, 48 S.
- LEWIN, S. Z. & CHAROLA, A. E. (1981): *Plant life on stone surfaces and its relation to stone conservation* – Scanning Electron Microscopy, **1981 Part 1**: 563-568.
- LEWIS, S., HOLNESS, M. & GRAHAM, C. (1998): *Ion microprobe study of marble from Naxos, Greece: Grain-scale fluid pathways and stable isotope equilibration during metamorphism* – Geology, **26**(10): 935-938.
- LEWIS, S. (1999): *Metamorphic fluid flow and stable isotope modification in marble: an example from Naxos, Greece*, Dissertation - University of Edinburgh.
- LEXIKON DER GEOWISSENSCHAFTEN (2004): *Archäometrie* – <<http://www.wissenschaft-online.de>> Spektrum Akademischer Verlag, eingesehen 3.4.2004
- LIN, S. & HUANG, W. (2004): *Polycrystalline calcite to aragonite transformation kinetics: experiments in synthetic systems* – Contributions to Mineralogy and Petrology, (eFIRST).
- LIPIN, B. R. & MCKAY, G. A. (Hrsg.) (1989): *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*, - Reviews in Mineralogy, 21, Mineralogical Society of America, 348 S.

- LIRITZIS, I. & GALLOWAY, R. B. (1999): *Dating implications from solar bleaching of thermoluminescence of ancient marble* – Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **241**(2): 361-368.
- LIRITZIS, I. (2001): *Searching for precision of a new "luminescence clock" in dating calcitic rocks* – Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **247**(3): 727-730.
- LIVADAROS, R. & TSAIMOU, C. (1996): *Recent evidence on ancient underground exploitation of the white marble of Paros "Lychnitis"* – Oryktos Ploutos = Mineral Wealth, **101**: 33-40.
- LLOYD, R. V., SMITH, P. W. & HASKELL, H. W. (1985): *Evaluation of the manganese ESR method of marble characterization* – Archaeometry, **27**(1): 108-116.
- LOGAN, J. M. (2004): *Laboratory and case studies of thermal cycling and stored strain on the stability of selected marbles* – Environmental Geology, (efirst).
- LONGERICH, H. P., FREYER, B. J., STRONG, D. F. & KANTIPULY, C. J. (1987): *Effect of operating conditions on the determination of rare earth elements by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS)* – Spectrochimica Acta, **42**(B): 75-92.
- LYONS, W. B., NEZAT, C. A., BENSON, L. V., BULLEN, T. D., GRAHAM, E. Y., KIDD, J., WELCH, K. A. & THOMAS, J. M. (2002): *Strontium isotopic signatures of the streams and lakes of Taylor Valley, southern Victoria Land, Antarctica: Chemical weathering in a polar climate* – Aquatic Geochemistry, **8**(2): 75-95.
- MADEN TEKTİK VE ARAMA (1964): *1:500000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritasi - Geological map of Turkey, Sheet Izmir, Maden Tektik ve Arama Enstitüsü Yayınlarından, Ankara.*
- MAHMUTOGLU, Y. (1998): *Mechanical Behaviour of Cyclically Heated Fine Grained Rock* – Rock Mechanics and Rock Engineering, **31**(3): 169-179.
- MAISCHBERGER, M. (1997): *Marmor in Rom : Anlieferung, Lager- und Werkplätze in der Kaiserzeit*, Dr. Ludwig Reichert Verlag, Wiesbaden, 190 S.
- MAKSIMOVIC, Z. J. & PANTO, G. (1996): *Authigenic rare earth minerals in karst-bauxites and karstic nickel deposits* – In: JONES, A. P., WALL, F. & WILLIAMS, C. T. (Hrsg.) Rare Earth Minerals - Chemistry, origin and ore deposits, 257-279, London (Chapman & Hall).
- MALAGA-STARZEC, K., PANAS, I., LINDQVIST, J. E. & LINDQVIST, O. (2003): *Efflorescence on thin sections of calcareous stones* – Journal of Cultural Heritage, **4**(4): 313-318.
- MANDI, V., MANIATIS, Y., BASSIAKOS, Y. & KILIKOGLU, V. (1992): *Provenance investigation of marbles with ESR-spectroscopy: further developments* – In: WAELKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period, 213-222, Leuven, Belgium (Leuven University Press).
- MANDI, V., VASSILIOU, A., MANIATIS, Y. & GRIMANIS, A. P. (1995): *An evaluation of the contribution of trace elements to the determination of marble provenance* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) The study of marble and other stones used in antiquity - ASMOSIA III, Athen, Griechenland, 1993 London (Archetype Publisher).
- MANFRA, L., MAASI, U. & TURI, B. (1975): *Carbon and oxygen isotopic ratios of marbles from ancient quarries of Western Anatolia and their archaeological significance* – Archaeometry, **17**(2): 215-221.
- MANIATIS, Y. & POLIKRETI, K. (2001): *White marbles in antiquity; provenance determination with use of physicochemical techniques* – In: VARTI MATARANGAS, M. (Hrsg.) The building stone in monuments. Interdisciplinary workshop. Athens, Greece. Nov. 9-11, 2001. Conference-Documents, 119-131, Athens (Institute of Geology and Mineral Exploration).
- MANIATIS, Y., PAPADOPOULOS, S., DOTSIKA, E., KAVOUSSANAKI, D. & TZAVIDOPOULOS, I. (2003): *Provenance investigation of Neolithic marble vases from Limenaria, Thassos: imported marble to Thassos?* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- MANNONI, L. & MANNONI, T. (1980): *Marmor: Material und Kultur*, Callwey, München, 234 S.
- MANNONI, L. & MANNONI, T. (1989): *Marble : the history of a culture*, Facts On File, New York ; Oxford, 284 S.
- MANSCH, R. & BECK, E. (1998): *Biodeterioration of natural stone with special reference to nitrifying bacteria* – Biodegradation, **9**(1): 47-64.
- MARAVELAKI, K. P. (2001): *Encrustation of Pentelic marble; cleaning and evaluation with laser techniques* – In: VARTI MATARANGAS, M. (Hrsg.) The building stone in monuments, 321-331, (Institute of Geology and Mineral Exploration. Athens, Greece).

- MARAVELAKI-KALAITZAKI, P., ZAFIROPOULOS, V. & FOTAKIS, C. (1999): *Excimer laser cleaning of encrustation on Pentelic marble: procedure and evaluation of the effects* – Applied Surface Science, **148**(1-2): 92-104.
- MARBLE INSTITUTE OF AMERICA. (1997): *Stone selection and stone testing*, Marble Institute of America, Columbus, Ohio, 17 S.
- MARBLE INSTITUTE OF AMERICA. (1999): *Design manual*, Marble Institute of America, Columbus, Ohio, 226 S.
- MARGONIS, S. V. & SHOWERS, W. (1988): *Weathering characteristics, age and provenance determination on ancient Greek and Roman marble artifact*. – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) Classical marble : geochemistry, technology, trade, Vol. 153, 233-242, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- MARINONI, N., PAVESE, A. & TROMBINO, L. (2003): *The characterisation of rock texture on thin sections by digital image processing* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- MARINOS, G. P. (1948): *Notes on the structure of Greek marbles* – American Journal of Science, **246**(6): 386-389.
- MARIOLAKOS, I., PAPANIKOLOU, D. & ALEXOPOULOS, A. (1976): *The role of structural analysis in the exploitation of the marble in Pentelikon Mountain, Attica* – Annales Geologiques des Pays Heléniques, **28**: 523-541.
- MARIOTTINI, M., CURTI, E. & MOSCETTI, E. (2003): *The taste of the marbles in roman villae (Tiburina - Nomentana)* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- MARSHALL, D. J. (Hrsg.) (1988): *Cathodoluminescence of Geological Materials*, -, Boston, USA.
- MARTÍNEZ-CABEZA-DE-VACA-ALAJARÍN, J. & TOMÁS-BALIBREA, L.-M. (1999): *Automatic Classification System of Marble Slabs in Production Line According to Texture and Color Using Artificial Neural Networks* – In: SOLINA, F. & LEONARDIS, A. (Hrsg.) CAIP'99, LNCS 1689 - Computer Analysis of Images and Patterns, 167-174, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg).
- MAS, D. L. & CROWLEY, P. D. (1996): *The effect of second-phase particles on stable grain size in regionally metamorphosed polyphase calcite marbles* – Journal of Metamorphic Geology, **14**(2): 155-162.
- MASSEY, S. W. (1999): *The effects of ozone and NOx on the deterioration of calcareous stone* – Science of the Total Environment, **227**(2-3): 109-121.
- MATTHES, S. (1987): *Mineralogie, eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*, Springer Verlag, Berlin, 444 S.
- MATTHEWS, A., LIEBERMAN, J., AVIGAD, D. & GARFUNKEL, Z. (1999): *Fluid-rock interaction and thermal evolution during thrusting of an Alpine metamorphic complex (Tinos island, Greece)* – Contributions to Mineralogy and Petrology, **135**: 212-224.
- MATTHEWS, A., BAKER, J. & MATTEY, D. P. (2002): *High-temperature metamorphism in marbles as a consequence of volatile release from crystallizing anatectic melts, Naxos, Greece* – European Journal of Mineralogy, **14**(1): 37-47.
- MATTHEWS, K. J. (1988): *Variability in stable isotope analysis; implications for joining fragments* – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) Classical marble : geochemistry, technology, trade, Vol. 153, 339-346, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- MATTHEWS, K. J., MOENS, L., WALKER, S. & DE PAEPE, P. (1992): *The re-evaluation of stable isotope data for pentelic marble* – In: WAELEKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period, 203-212, Leuven, Belgium (Leuven University Press).
- MATTHEWS, K. J., LEESE, M. N., HUGHES, M. J., HERZ, N. & BOWMAN, S. G. E. (1995): *Establishing the provenance of marble using statistical combinations of stable isotope and neutron activation data* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) The study of marble and other stones used in the antiquity, 181-186, London (Archetype Publisher).
- MATTHEWS, K. J. (1997): *The establishment of a data base of neutron activation analyses of white marble* – Archaeometry, **39**(2): 321-332.
- MCCREA, J. M. (1950): *Isotopic chemistry of carbonates and palaeotemperature scale* – Journal of Chemical Physics, **18**: 849-57.

- MCLENNAN, S. M. (1989): *Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes* – In: LIPIN, B. R. & MCKAY, G. A. (Hrsg.) *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*, Vol. 21, 169-200, (Reviews in Mineralogy).
- MCNEILL, G. W. (1999): *Variations in the weathering rate of Scottish gravestones as an environmental signature of atmospheric pollution* – *Environmental Geochemistry and Health*, **21**(4): 365-370.
- MEER, S. D. (2002): *Deformation mechanisms, rheology and tectonics : current status and future perspectives*, Geological Society of London, London, 416 S.
- MELEZHIK, V. A., GOROKHOV, I. M., FALLICK, A. E. & GJELLE, S. (2001): *Strontium and carbon isotope geochemistry applied to dating of carbonate sedimentation: an example from high-grade rocks of the Norwegian Caledonides* – *Precambrian Research*, **108**(3-4): 267-292.
- MELLO, E. (1983): *Studio della provenienza di marmi bianchi mediante analisi degli elementi in trace e uso della pattern recognition all'elaboratore elettronico* – In: DOLCI, E. (Hrsg.) *Marmo restauro*, 150-162, Carrara (Museo del Marmo).
- MELLO, E., MELONI, S., MONNA, D. & ODDONE, M. (1988a): *A computer-based pattern recognition approach to the provenance study of Mediterranean marbles through trace element analysis* – In: HERZ, N. & WAELKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble : geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 283-291, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- MELLO, E., MONNA, D. & ODDONE, M. (1988b): *Discriminating sources of Mediterranean marbles: a pattern recognition approach* – *Archaeometry*, **30**(1): 102-108.
- MELONI, S., ODDONE, M. & ZEZZA, F. (1995): *Rare-earth-element patterns of white marble samples from ancient quarries in Carrara (Italy)* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) *The study of marble and other stones used in the antiquity*, 171-180, London (Archetype Publisher).
- MENTZOS, A., BARBIN, V. & HERRMANN JR., J. J. (2003): *Calcitic marble from Thasos in Macedonia and in Nea Anchialos, Magnesia, Central Greece* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- MERLINO, S. & ORLANDI, P. (2001): *Carraraite and zaccagnaite, two new minerals from the Carrara marble quarries: their chemical compositions, physical properties, and structural features* – *American Mineralogist*, **86**(10): 1293-1301.
- MERT, I. H. (1999): *Untersuchungen zur hellenistischen und kaiserzeitlichen Bauornamentik von Stratonikeia*, Archäologisches Institut der Universität zu Köln, Köln, 344 S.
- MEZGER, K. & OKRUSCH, M. (1985): *Metamorphism of the variegated sequences at Kallithea, Samos, Greece* – *TMPM. Tschermarks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **34**(1, 1-14): 67-82.
- MIELSCH, H. (1985): *Buntmarmore aus Rom im Antikenmuseum Berlin*, Staatliche Museen Preussischer Kulturbesitz, Berlin, 70 + 24 Bildtafeln S.
- MOENS, L., ROOS, P., DE, R. J., DE, P. P. & WAELKENS, M. (1987): *Identification of archeologically interesting white marbles by instrumental neutron activation analysis (INAA) and petrography; comparison between samples from Afyon and Usak (Turkey)* – *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, **5**(2-3): 101-114.
- MOENS, L., ROOS, P., DE RUDDER, J., DE PAEPE, P., VAN HENDE, J. & WAELKENS, M. (1988a): *A multi-method approach to the identification of white marbles used in antique artifacts* – In: HERZ, N. & WAELKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble : geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 243-250, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- MOENS, L., ROOS, P., DE RUDDER, J., HOSTE, J., DE PAEPE, P., VAN HENDE, J., MARÉCHAL, R. & WAELKENS, M. (1988b): *Chemical and petrographical identification of white marbles from the Mediterranean area. I. Comparison between Carrara and Marmara marbles* – *Archaeometry*.
- MOENS, L., ROOS, P., DE PAEPE, P. & LUNSINGH SCHEURLEER, R. (1992): *Provenance determination of white marble sculptures from the Allard Pierson Museum in Amsterdam, based on chemical, microscopic and isotopic criterias* – In: WAELKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 269-276, Leuven (Leuven University Press).
- MOLLI, G. & HEILBRONNER, R. (1999): *Microstructures associated with static and dynamic recrystallization of Carrara marble (Alpi Apuane, NW Tuscany, Italy)* – *Geologie En Mijnbouw*, **78**(1): 119-126.

- MOLLI, G., CONTI, P., GIORGETTI, G., MECCHERI, M. & OESTERLING, N. (2000): *Microfabric study on the deformational and thermal history of the Alpi Apuane marbles (Carrara marbles), Italy* – Journal of Structural Geology, **22**: 1809-1825.
- MOLTESEN, M., HERZ, N. & MOON, J. (1992): *The Lepsius Marbles* – In: WAELEKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 277-281, Leuven, Belgium (Leuven University Press).
- MOLTESEN, M. (1994): *The Lepsius marble samples*, Ny Carlsberg Glyptotek, [Copenhagen], 94p S.
- MONNA, D. & PENSABENE, P. (1977): *Marmi dell'Asia Minore*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 259 S.
- MONTE, M. (2003): *Oxalate film formation on marble specimens caused by fungus* – Journal of Cultural Heritage, **4**(3): 255-258.
- MOROPOULOU, A., BISBIKOU, K., TORFS, K., VAN GRIEKEN, R., ZEZZA, F. & MACRI, F. (1998): *Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere* – Atmospheric Environment, **32**(6): 967-982.
- MOROPOULOU, A., BISBIKOU, K., VAN GRIEKEN, R., TORFS, K. & POLIKRETI, K. (2001): *Correlation between aerosols, deposits and weathering crusts on ancient marbles* – Environmental Technology, **22**(6): 607-618.
- MOROPOULOU, A., TSIOURVA, T., BISBIKOU, K., TSANTILA, V., BISCONTIN, G., LONGEGA, G., GROGGIA, M., DALAKLIS, E. & PETRITAKI, A. (2002): *Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the center of Athens* – Building and Environment, **37**(7): 753-760.
- MORSE, J. W. & ARVIDSON, R. S. (2002): *The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals* – Earth-Science Reviews, **58**(1-2): 51-84.
- MORTEANI, G. & PREINFALK, C. (1996): *REE distribution and REE carriers in laterites formed on the alkaline complexes of Araxá and Catalão (Brazil)* – In: JONES, A. P., WALL, F. & WILLIAMS, C. T. (Hrsg.) *Rare Earth Minerals - Chemistry, origin and ore deposits*, 228-255, London (Chapman & Hall).
- MOSSOTTI, V. G. (2002): *The effect of selected cleaning techniques on Berkshire Lee marble - A scientific study at Philadelphia City Hall*, U.S. Dept of the Interior U.S. Geological Survey, Reston, Va., 1 CD-ROM S.
- MOTTERSHEAD, D. N., BAILY, B., COLLIER, P. & INKPEN, R. J. (2003): *Identification and quantification of weathering by plant roots* – Building and Environment, **38**(9-10): 1235-1241.
- MOURTZAS, N. & STAVROPOULOS, K. (1989): *Recent tectonic evolution of the coast of Samos, eastern Aegean* – In: PAPANIKOLAOU, D. (Hrsg.) *4th congress of the Geological Society of Greece; proceedings.*, Vol. 23; 1, 223-241, Athens, Greece (Ellenike Geologike Etaireia).
- MOUZAKIS, H. P., PSYCHARIS, I. N., PAPASTAMATIOU, D. Y., CARYDIS, P. G., PAPANTONOPOULOS, C. & ZAMBAS, C. (2002): *Experimental investigation of the earthquake response of a marble classical column* – Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **31**(9): 1681-1698.
- MPOSKOS, E. (1978): *Diasporit- und Smirgelvorkommen der Insel Samos (Griechenland)* – In: AUGUSTITHIS, S. S. (Hrsg.) *Bauxites.*, Vol. 2, 614-631, (International).
- MPOSKOS, E. (1986): *Metamorphic basement of Samos; evidence of type and degree of metamorphism* – Deltio tes Ellenikes Geologikes Etaireias = Bulletin of the Geological Society of Greece, **18**: 223-236.
- MÜLLER, F. (Hrsg.) (1984-1998): *Internationale Natursteinkartei (INSK)*, - 1-10, Ebner, Ulm.
- MÜLLER, H. W., SCHWAIGHOFER, B., BENEÀ, M., PISO, I. & DIACONESCU, A. (1996): *Greek marbles in the Roman province of Dacia* – In: [HTTP://WWW.ARCHAOMETRY.GR/EAE/EAE/](http://www.archaeometry.gr/EAE/EAE/) (Hrsg.) Greek Society for Archaeometry Conference Athens 1996 - Abstracts Athens
- MUNSELL COLOR (1995): *Rock-Color Chart*, 8th printing, The Rock-Color Chart Committee - The Geological Society of America.
- MUSS, U., BAMMER, A., MOENS, L., DE PAEPE, P., DE DONDER, J., KOLLER, K. & AURENHAMMER, M. (2003): *Provenance study of marble from the Artemision of Ephesos* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- NAPOLEONE, C. & CANALI, L. (Hrsg.) (2001): *Delle pietre antiche di Faustino Corsi romano*, - F.M. Ricci, Milano, 167 S.
- NEGRIS, P. (1915): *Roches cristallogylliennes et tectonique de la Grèce*, Athens.

- NEIL, D. (1989): *Weathering rates of a subaerially exposed marble in eastern Australia* – Zeitschrift für Geomorphologie, **33**(4): 463-473.
- NIKITIN, A. N., IVANKINA, T. I., SOBOLEV, G. A., SCHEFFZUK, C., FRISCHBUTTER, A. & WALTHER, K. (2004): *Neutron diffraction study of intracrystalline strains and stresses in a marble sample at high temperatures and external mechanical loads* – Izvestiya-Physics of the Solid Earth, **40**(1): 83-90.
- NUGARI, M. P. & PIETRINI, A. M. (1997): *Trevi Fountain: An evaluation of inhibition effect of water-repellents on cyanobacteria and algae* – International Biodeterioration & Biodegradation, **40**(2-4): 247-253.
- OBERHÄNSLI, R., MONIE, P., CANDAN, O., WARKUS, F. C., PARTZSCH, J. H. & DORA, O. O. (1998a): *The age of blueschist metamorphism in the Mesozoic cover series of the Menderes Massif* – In: IEC 97; Fifth international eclogite conference., Vol. 78; 2, 309-316, Zürich, Switzerland (Staebli Verlag AG).
- OBERHÄNSLI, R., PARTZSCH, J., CETINKAPLAN, M. & CANDAN, O. (1998b): *Hochdrucküberprägung in Teilen der Lykischen Decken (Südwest Türkei)* – Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, **1998**(1): 206.
- OCKENGA, E. (1989a): *Kobalthaltiger Zinkstaurolith von Samos (Griechenland)* – In: Referate der Vorträge und Poster; 67. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Vol. 1989; 1, 139, Stuttgart, Federal Republic of Germany (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- OCKENGA, E. (1989b): *Zinkhoegbomit aus Metabauxiten von Samos (Griechenland)* – In: Referate der Vorträge und Poster; 67. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Vol. 1989; 1, 140, Stuttgart, Federal Republic of Germany (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- OCKENGA, E. & OKRUSCH, M. (1990): *Petrologie und Geochemie von Metabauxiten in der Zentral- und Ost-Ägäis (Griechenland)* – In: Referate der Vorträge und Poster; 68. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft., Vol. 1990; 1, 192, Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- OCKENGA, E., YALCIN, U., MEDENBACH, O. & SCHREYER, W. (1998): *Zinchoegbomite, a new mineral from eastern Aegean metabauxites* – European Journal of Mineralogy, **10**(6): 1361-1366.
- OGILVIE, R. E. (2001): *A few examples of electron microanalysis of art objects at the Boston Museum of Fine Arts* – Microscopy and Microanalysis, **7**(2): 193-199.
- OHNESORG, A. (1993): *Inselionische Marmordächer* – Denkmäler antiker Architektur, **18**(2): 159.
- OKAY, A. I., SATIR, M., MALUSKI, H., SIYAKO, M., MONIE, P., METZGER, R. & AKYÜZ, S. (1996): *Paleo- and Neo-Tethyan events in north-western Turkey: geologic and geochronologic constraints* – In: YIN, A. & HARRISON, M. (Hrsg.) The tectonic evolution of Asia, 420-441, Cambridge (Cambridge University Press).
- OKAY, A. I. (2001): *Stratigraphic and metamorphic inversions in the central Menderes Massif: a new structural model* – International Journal of Earth Sciences, **89**: 709-727.
- OKAY, A. I. (2002): *Stratigraphic and metamorphic inversions in the central Menderes massif. A new structural model* – International Journal of Earth Sciences, **91**: 173-178.
- OLSON, T. F. (1995): *Marble solutions: understanding a product of nature*, Hi-Tech Solutions, Mechanicsville, Va., 117 S.
- ONDRASINA, J., KIRCHNER, D. & SIEGESMUND, S. (2002): *Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: a long-term experiment* – In: Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies, 9-18, Bath (GEOLOGICAL SOC PUBLISHING HOUSE).
- ORKOULA, M. G. & KOUTSOUKOS, P. G. (2001): *Dissolution effects on specific surface area, particle size, and porosity of Pentelic marble* – Journal of Colloid and Interface Science, **239**(2): 483-488.
- ÖZGAN, R. (1982): *Zur Datierung des Artemisaltars in Magnesia am Maeander* – Istanbulur Mitteilungen, **32**: 196-209.
- OZGUR, N. & PEKDEGER, A. (1994): *Aktive und fossile Geothermalsysteme in den kontinentalen Riftzonen des Menderes Massives, W-Anatolien/ Türkei* – In: GERMANN, K., LEHMANN, B., LIST, F. K. & SCHNEIDER, H. J. (Hrsg.) Festschrift zum 70. Geburtstag von Professor Dr. Hans-Jochen Schneider - Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A: Geologie und Paläontologie, Vol. 167, 131-139, Berlin (Dietrich Reimer).
- OZLER, H. M. (2000): *Hydrogeology and geochemistry in the Curuksu (Denizli) hydrothermal field, western Turkey* – Environmental Geology, **39**(10): 1169-1180.
- PANOZZO, R. (1983): *Two-dimensional analysis of shape fabric using projection of lines in a plane* – Tectonophysics, **95**: 279-294.

- PANOZZO, R. & HÜRLIMANN, H. (1983): *A simple method for the quantitative discrimination of convex and convex-concave lines* – *Microscopica Acta*, **87**: 169-176.
- PANOZZO, R. (1984): *Two-dimensional strain from the orientation of lines in a plane* – *Journal of Structural Geology*, **6**: 215-221.
- PAPANIKOLAOU, D. (1977): *On the structural geology and tectonics of Paros Island (Aegean Sea)* – *Annales Géologiques des Pays Helléniques*, **28**: 450-464.
- PAPANIKOLAOU, D. (1980): *Contribution to the geology of the Aegean Sea: the Island of Paros* – In: *Annales Géologiques des Pays Helleniques*, Vol. 30, 65-96, Athens
- PAPANIKOLAOU, D. (1996): *Geological Map of Paros, 1:50000*, IGME, Athens.
- PAPANTONOPOULOS, C., PSYCHARIS, I. N., PAPASTAMATIOU, D. Y., LEMOS, J. V. & MOUZAKIS, H. P. (2002): *Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method* – *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**(9): 1699-1717.
- PARADISE, T. R. (1998): *Limestone weathering and rate variability, Great Temple of Amman, Jordan* – *Physical Geography*, **19**(2): 133-146.
- PASSEGIA, L. (2000): *Sculpture as economic enterprise. Francesco Lazzarini and the Carrara lobby in Rome from the end of the 18th century to the beginning of the 19th century* – *Ricerche Di Storia Dell Arte*, (70): 41-50.
- PEARL, Z. E., MAGARITZ, M., AMIT, D. & ILAN, Z. (1990): *The Maon Synagogue menorah marble fragments; reconstruction based on stable isotopes analysis* – In: *Israel Geological Society annual meeting, 1990.*, Vol. 1990, 64, Jerusalem, Israel (Israel Geological Society).
- PEARSON, E. S. & HARTLEY, H. O. (Hrsg.) (1966): *Biometrika Tables for Statisticians*, - Vol. I, Univ. Press, Cambridge.
- PEKDEGER, A. & GIESE, L. B. (1998): *Ein Geothermalmmodell fuer den östlichen Büyüek-Menderes-Graben, W-Anatolien/ Türkei* – In: *SCHRÖDER, J. H., HOLL, H. G. & BRUNSMANN, A. (Hrsg.) Geowissenschaften in Ökonomie und Ökologie - Das System Erde - Programm und Zusammenfassungen der Tagungsbeiträge. Geo-Berlin '98*, Vol. 98-3, 136, Bonn (Alfred-Wegener-Stiftung).
- PENSABENE, P. & ARTHUR, P. (1985): *Marmi antichi : problemi d'impiego, di restauro e d'identificazione, "L'Erma" di Bretschneider*, Roma, 254 S.
- PENSABENE, P., BRUNO, M. & STUTO, G. (1998): *Il marmo e il colore : guida fotografica. I marmi della Collezione Podesti, L'Erma di Bretschneider*, Roma, 16 p., [13] p. of col. plates S.
- PE-PIPER, G. & TSOLIS, K. P. (1991): *K-rich mordenite from late Miocene rhyolitic tuffs, Island of Samos, Greece* – *Clays and Clay Minerals*, **39**(3): 239-247.
- PESCHLOW-BINDOKAT, A. (1981): *Die Steinbrüche von Milet und Herakleia am Latmos* – *Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts*, **96**: 157-213.
- PHILIPPSON, A. (1959): *Die griechischen Landschaften IV*, Klostermann, Frankfurt a.M.
- PHILLIPSON, A. (1901): *Beiträge zur Kenntnis der griechischen Inselwelt* – In: *Petermanns Mitteilungen*, Erg. H., Vol. 134, 172, Gotha
- PHILLIPSON, A. (1911): *Reisen und Forschungen im westlichen Kleinasien* – In: *Petermanns Mitteilungen*, Erg.Bd, Vol. 36, Heft 167, 92-100, Gotha
- PHOTIADES, A. D. (2002): *The ophiolitic molasse unit of Ikaria Island (Greece)* – *Turkish Journal of Earth Sciences*, **11**(1): 27-38.
- PIERI, M. (1999): *Shear deformation of calcite rocks rheology and microfabric evolution of Carrara marble under dynamic recrystallization during torsion experiments*, Zürich, 145 S.
- PIERI, M., BURLINI, L., KUNZE, K., STRETTON, I. & OLGAARD, D. L. (2001a): *Rheological and microstructural evolution of Carrara Marble with high shear strain; results from high temperature torsion experiments* – *Journal of Structural Geology*, **23**(9): 1393-1413.
- PIERI, M., KUNZE, K., BURLINI, L., STRETTON, I., OLGAARD, D. L., BURG, J. P. & WENK, H. R. (2001b): *Texture development of calcite by deformation and dynamic recrystallization at 1000 K during torsion experiments of marble to large strains* – *Tectonophysics*, **330**(1-2): 119-140.
- PIKE, S., VAUGHAN, S. & HERZ, N. (1999): *Ceramic provenance and the Aegean marble stable isotope database; a study of early Bronze Age "Marble Ware" from the Aegean Islands of Amorgos, Keros and Naxos* – In: *Geological Society of America, Southeastern Section, 48th annual meeting.*, Vol. 31; 3, 60, Boulder, CO, United States (Geological Society of America (GSA)).
- PIKE, S. H. (2000): *Archaeological geology and geochemistry of Pentelic Marble, Mount Pentelikon, Attica, Greece*, Dissertation - University of Georgia, Athens, GA, USA.

- PINTO, J. C., SOUSA, J. M. & ALEXANDRE, H. (2003): *New Distance Measures Applied to Marble Classification* – In: SANFELIU, A. & RUIZ-SHULCLOPER, J. (Hrsg.) CIARP 2003, LNCS 2905, Progress in Pattern Recognition, Speech and Image Analysis, 383-390, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg).
- POCHMARSKI, E. (1999): *Zum Rundmonument in Pergamon, Steine und Wege, Festschrift für Dieter Knibbe* – In: SCHERRER, P., TAEUBER, H. & THÜR, H. (Hrsg.), 321-326,
- POCOCKE, R. (1745): *A Descripton of the East and Some other Countries, II 2, S. 27*, zitiert in Kienast, 1992.
- POHL, W. (2000): *Wechselwirkungen zwischen endolithischen Biofilmen und Karbonatgesteinen in alpinen Gebieten Mitteleuropas*, Dissertation - Georg-August-Universität, Göttingen, 175 S.
- POLIKRETI, K. & MANIATIS, Y. (2002): *A new methodology for the provenance of marble based on EPR spectroscopy* – *Archaeometry*, **44**: 1-21.
- POLIKRETI, K. & MANIATIS, Y. (2003a): *Ionic and charge mobility on weathered marble surfaces, studied by EPR spectroscopy* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- POLIKRETI, K. & MANIATIS, Y. (2003b): *Micromorphology, composition and origin of the orange patina on the marble surfaces of Propylaea (Acropolis, Athens)* – *Science of the Total Environment*, **308**(1-3): 111-119.
- POLIKRETI, K., MICHAEL, C. T. & MANIATIS, Y. (2003): *Thermoluminescence characteristics of marble and dating of freshly excavated marble objects* – *Radiation Measurements*, **37**(1): 87-94.
- POLLOCK, J. (2004): *Geology of the Roman Catholic Basilica of St. John the Baptist, St. John's, Newfoundland* – *Geoscience Canada*, **31**(1): 1-10.
- PONTI, G. (1996): *Ancient quarrying at Aphrodisias in the light of the geological configuration* – In: ROUECHÉ, C. & SMITH, R. R. R. (Hrsg.) *Aphrodisias papers 3 - J. Roman Archaeology suppl.ser no. 20*, 105-110,
- POPE, G. A., MEIERDING, T. C. & PARADISE, T. R. (2002): *Geomorphology's role in the study of weathering of cultural stone* – *Geomorphology*, **47**(2-4): 211-225.
- POSCHLOD, K. (1990): *Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung*, F. Pfeil, München, 62 S.
- POULIOS, I., SPATHIS, P., GRIGORIADOU, A., DELIDOU, K. & TSOUMPARIS, P. (1999): *Protection of marbles against corrosion and microbial corrosion with TiO₂ coatings* – *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, **34**(7): 1455-1471.
- PRIKRYL, R. & VILES, H. A. (Hrsg.) (2002): *Understanding and managing of stone decay - (SWAPNET 2001)*, - Charles University - The Karolinum Press, Prag, 367 S.
- QUICK, G. W. (2002): *CSIRO guide to the specification of dimension stone*, CSIRO. Building, Construction and Engineering, <http://www.publish.csiro.au>.
- RADT, W. & STEINER, E. (1988): *Pergamon: Geschichte und Bauten, Funde und Erforschung einer antiken Metropole*, DuMont, Köln, 401 S.
- RADT, W. (1999): *Pergamon: Geschichte und Bauten einer antiken Metropole. Mit Fotos von Elisabeth Steiner*, Primus-Verlag, Darmstadt, 376 S.
- RAEDER, J. (1984): *Priene : Funde aus einer griechischen Stadt im Berliner Antikenmuseum*, Mann, Berlin, 92 S.
- RAMEZ, M. R. H. & MURRELL, S. A. F. (1964): *A petrofabric analysis of Carrara marble* – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **1**(2): 217-229.
- RAMSEY, J. M. & CHESTER, F. M. (2004): *Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture* – *Nature*, **428**(6978): 63-66.
- RAMSEYER, K., FISCHER, J., MATTER, A., EBERHARDT, P. & GEISS, J. (1989): *A cathodoluminescence microscop for low intensity luminescence* – *Journal of Sedimentary Petrology*, **59**: 619-622.
- RAMSEYER, K., DECROUEZ, D., BARBIN, V., BURNS, S. J., MOENS, L., DE PAEPE, P., ROOS, P., CHAMAY, J. & MAIER, J. L. (1992): *Provenance Investigation of marble artifacts now in the collection of the Museum of Art and History in Geneva* – In: WAELEKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones: quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 287-292, Leuven, Belgium (Leuven University Press).
- RANALLI, G., CHIAVARINI, M., GUIDETTI, V., MARSALA, F., MATTEINI, M., ZANARDINI, E. & SORLINI, C. (1997): *The use of microorganisms for the removal of sulphates on artistic stoneworks* – *International Biodeterioration & Biodegradation*, **40**(2-4): 255-261.

- RAPETTI, C. (2001): *Michelangelo, Carrara e i maestri di cavar marmi*, Quaderni dell'Istituto di storia della cultura materiale, Firenze, 98 S.
- RAYET, O. & THOMAS, A. (1877): *Milet et le Golfe Latmique : Tralles, Magnésie du Méandre, Priène, Milet, Didymes, Héraclée du Latmos : Fouilles et explorations archéologiques faites aux frais de MM. les barons G. et E. de Rothschild et publiées sous les auspices du Ministère de l'Instruction publique et des beaux-arts*, J. Baudry, Paris.
- RECHEIS, A., BIDNER, T. & MIRWALD, P. W. (2002): *The differences of the ultrasonic velocity of the two marble portals of Schloss Tirol/South Tyrol - a case of weathering or of material?* – In: PRIKRYL, R. & VILES, H. A. (Hrsg.) *Understanding and managing of stone decay - (SWAPNET 2001)*, 183-188, Prag (Charles University - The Karolinum Press).
- RÉGNIER, J. L., RING, U., PASSCHIER, C. W., GESSNER, K. & GÜNGÖR, T. (2003): *Contrasting metamorphic evolution of metasedimentary rocks from the Çine and Selimiye nappes in the Anatolide belt, western Turkey* – *Journal of Metamorphic Geology*, **21**(7): 699-721.
- REHM, A., WIEGAND, T., KRAUSE, K. & WILSKI, P. (1929): *Die milesische Landschaft*, H. Schoetz und Co., Berlin, 49 S.
- RENFREW, P. (1968): *Aegean Marble: A petrological study* – *Annual of the British School at Athens*, **63**: 45-64.
- REUTHER, O. (1957): *Der Heratempel von Samos; der Bau seit der Zeit des Polykrates*, Gebr. Mann, Berlin,, 75 p. S.
- RHEIDT, K. (1996): *Pergamenische Ordnungen - Der Zeustempel und seine Bedeutung für die Architektur der Attaliden* – *Säule und Gebälk*, (DiskAB 6): 162-180.
- RIEDEL, E. (1990): *Allgemeine und Anorganische Chemie*, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- RIEDERER, J. (1988): *The decay and conservation of marbles on archaeological monuments* – In: HERZ, N. & WAELKENS, M. (Hrsg.) *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Vol. 153, 465-474, Dordrecht, Boston (Kluwer Academic Publishers).
- RIEMANN, H. (1963): *Priene* – *RE*, **XXIV**: 459-507.
- RING, U. (1998): *Exhumation of blueschists from Samos Island, Greece* – In: *Proceedings of the 8th international congress of the Geological Society of Greece with emphasis on environmental geology.*, Vol. 32; 1, 97-104, Athens, Greece (Ellenike Geologike Etaireia).
- RING, U., GESSNER, K., GÜNGÖR, T. & PASSCHIER, C. W. (1999a): *The Menderes Massif of western Turkey and the Cycladic Massif in the Aegean - do they really correlate* – *J Geol Soc Lond*, **156**: 3-6.
- RING, U., LAWS, S. & BERNET, M. (1999b): *Structural analysis of a complex nappe sequence and late-orogenic basins from the Aegean island of Samos, Greece* – *Journal of Structural Geology*, **21**(11): 1575-1601.
- ROBERT, E. (1982): *Contribution à l'étude géologique des Cyclades: L'île de Paros (Grèce)*, Thèse 3^e Cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 198 S.
- ROBERT, U., FODEN, J. & VARNE, R. (1992): *The Dodecanese Province, SE Aegean; a model for tectonic control on potassic magmatism* – In: FOLEY, S. & PECCERILLO, A. (Hrsg.) *Potassic and ultrapotassic magmas and their origin; Sixth meeting of the European Union of Geosciences (EUG VI)*. Vol. 28; 3-6, 241-260, Amsterdam, International (Elsevier).
- ROBERTS, S. M. (2002): *Using marble tombstones to measure weathering rates; new data and new constraints* – In: *Geological Society of America, 2002 annual meeting*. (Geological Society of America (GSA). Boulder, CO, USA).
- ROCKWELL, P. (1996): *The marble quarries: a preliminary survey* – In: ROUECHÈ, C. & SMITH, R. R. R. (Hrsg.) *Aphrodisias papers 3 - J. Roman Archaeology suppl.ser no.* **20**, 81-103,
- RÖDER, J. (1971): *Marmor Phrygium. Die antiken Marmorbrüche von Iscehisar in Westanatolien* – *Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts*, **86**: 251-321.
- RODRIGUEZ-NAVARRO, C., RODRIGUEZ-NAVARRO, A., ELERT, K. & SEBASTIAN, E. (2004): *Role of marble microstructure in near-infrared laser-induced damage during laser cleaning* – *Journal of Applied Physics*, **95**(7): 3350-3357.
- ROESLER, G. (1978): *Relics of non-metamorphic sediments on central Aegean Islands* – In: CLOSS, H., ROEDER, D. & SCHMIDT, K. (Hrsg.) *Alps, Apennines, Hellenides.*, Vol. 38, 480-481, Stuttgart, International (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- ROHLEDER, J. (2001): *The cultural history of limestone* – In: TEGETHOFF, F. W., ROHLEDER, J. & KROKER, E. (Hrsg.) *Calcium carbonate; from the Cretaceous period into the 21st century*, 53-135, Basel (Birkäuser Verlag).

- ROIG-SALOM, J.-L., DOMÉNECH-CARBÓ, M.-T., CRUZ-CAÑIZARES, J. D. L., BOLÍVAR-GALIANO, F., PELUFO-CARBONELL, M.-J. & PERAZA-ZURITA, Y. (2003): *SEM/EDX and vis spectrophotometry study of the stability of resin-bound mortars used for casting replicas and filling missing parts of historic stone fountains* – Analytical and Bioanalytical Chemistry, **375**(8): 1176-1181.
- ROOS, P., MOENS, L., DE, R. J., DE, P. P., VAN, H. J. & WAELEKENS, M. (1988): *Chemical and petrographical characterization of Greek marbles from Pentelikon, Naxos, Paros and Thasos* – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) Classical marble; geochemistry, technology, trade., Vol. 153, 263-272, Leiden, International (Noordhoff International Publishing).
- ROWLEY, W. (1804): *A description of the famous antique marble in basso-relievo, representing the apotheosis or deification of Homer : sculptured above 2000 years ago at Priene in Asia Minor*, London,.
- RUMSCHEID, F. (1994): *Untersuchungen zur kleinasiatischen Bauornamentik des Hellenismus*, von Zabern, Mainz, 352 S.
- RUMSCHEID, F. (1998): *Priene, Führer durch das "Pompeji Kleinasiens"*.
- RYBACH, L. & NISSEN, H. U. (1965): *Neutron activation of Mn and Na traces in marbles worked by the ancient Greeks* – Proc. Radiochemical Methods of Analysis, **1**: 105-107.
- RYE, R. O., SCHUILING, R. D., RYE, R. M. & JANSEN, J. B. H. (1976): *Carbon, hydrogen and oxygen isotope studies of the regional metamorphic complex at Naxos, Greece* – Geochimica et Cosmochimica Acta, **40**: 1031-1049.
- SAARELA, M., ALAKOMI, H. L., SUIHKO, M. L., MAUNUKSELA, L., RAASKA, L. & MATTILA-SANDHOLM, T. (2004): *Heterotrophic microorganisms in air and biofilm samples from Roman catacombs, with special emphasis on actinobacteria and fungi* – International Biodeterioration & Biodegradation, **54**(1): 27-37.
- SALIMBENI, R., PINI, R. & SIANO, S. (2001): *Achievement of optimum laser cleaning in the restoration of artworks: expected improvements by on-line optical diagnostics* – Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy, **56**(6): 877-885.
- SALINAS-NOLASCO, M. F., MENDEZ-VIVAR, J., LARA, V. H. & BOSCH, P. (2004): *Passivation of the calcite surface with malonate ion* – Journal of Colloid and Interface Science, **274**(1): 16-24.
- SANDER, B. (1950): *Einführung in die Gefüge geologischer Körper. 2. Teil: Die Korngefüge. (Probleme bei der Auswertung von U-Tischmessungen, dargestellt am Beispiel eines Marmors.)* – Clausthaler Tektonische Hefte, **10**: 299ff.
- SÄRKKÄ, P., ELORANTA, P. & (2001): *Rock mechanics : a challenge for society : proceedings of the International Society for Rock Mechanics. Regional Symposium Eurock 2001, Espoo, Finland, 4-7 June 2001*, A.A. Balkema, Lisse, 881 S.
- SATISH-KUMAR, M., WADA, H. & SANTOSH, M. (2002): *Constraints on the application of carbon isotope thermometry in high- to ultrahigh-temperature metamorphic terranes* – Journal of Metamorphic Geology, **20**(3): 335-350.
- SBARAGLIA, G., PITZURRA, L., MORONI, B., NOCENTINI, A., VITALI, M., POLI, G., MILIANI, C. & BISTONI, F. (2003): *Fungal colonization on stoneworks. Interaction fungi-powdered stone samples* – Annali Di Chimica, **93**(11): 889-896.
- SCHAZMANN, P. (1923): *Das Gymnasion: der Tempelbezirk der Hera Basileia* – Altertümer von Pergamon, **6**: 114.
- SCHEDE, M., KLEINER, G. & KLEISS, W. (1964): *Die Ruinen von Priene - kurze Beschreibung (1. Aufl. 1934)*, De Gruyter, Berlin, 113 S.
- SCHEFFZUEK, C., SIEGSMUND, S. & KOCH, A. (2004): *Strain investigations on calcite marbles using neutron time-of-flight diffraction* – Environmental Geology, (eFIRST).
- SCHIERMUND RONALD, L. (1991): *Steady-state weathering of limestone and marble by acidic precipitation: a quantitative laboratory simulation*, Dissertation - Colorado School of Mines, Golden, 278 S.
- SCHILARDI, D. & CHIOTIS, E. (2001): *Proposals for the restoration of the archaeological zone in the marble quarries at Pentelikon* – In: VARTI MATARANGAS, M. (Hrsg.) The building stone in monuments, 133-148, (Institute of Geology and Mineral Exploration. Athens, Greece).
- SCHLIEMANN, H. (1874): *Atlas trojanischer Alterthümer. Photographische Abbildungen zu dem Berichte über die Ausgrabungen in Troja*, Brockhaus, Leipzig, 57 S.
- SCHLIESTEDT, M., ALTHERR, R. & MATTHEWS, A. (1987): *Evolution of the Cycladic crystalline complex; petrology, isotope geochemistry and geochronology* – In: HELGESON HAROLD, C. (Hrsg.) Chemical transport in metasomatic processes., Vol. 218, 389-428, Dordrecht-Boston, International (D. Reidel Publishing Company).

- SCHMETZER, K. & BARTELKE, W. (1979): *Schleifwürdiger Diaspor aus der Tuerkei* – Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft, **28**(2): 69.
- SCHMID, J., AMBÜHL, M., DECROUEZ, D., MÜLLER, S. & RAMSEYER, K. (1999): *A quantitative fabric analysis approach to the discrimination of white marbles* – Archaeometry, **41**(2): 239-252.
- SCHMID, J. & FLAMMER, I. (2002): *How grey limestones become white marbles* – European Journal of Mineralogy, **14**(4): 837-848.
- SCHNEIDER, R. M. (1986): *Bunte Barbaren: Orientalenstatuen aus farbigem Marmor in der römischen Repäsentationskunst*, Wernersche Verlagsgesellschaft, Worms, 301 S.
- SCHRÖDER, B. & YALÇIN, Ü. (1991): *Milet 1990, Geologische Begleituntersuchungen* – Istanbuler Mitteilungen, **41**: 149-156.
- SCHUCHHARDT, C. (1899): *Die Arbeiten zu Pergamon 1886-1898* – Athener Mitteilungen, **24**: 148-151.
- SCHUCHHARDT, C. (1912): *Stadt und Land* – In: CONZE, A. (Hrsg.) *Altertümer von Pergamon*, Vol. I, 71.
- SCHUETT, H. & KAVUSAN, G. (1994): *Neogene Mollusken aus den Tertiärbecken bei Afyon, Türkei* – Geologica et Palaeontologica, **28**: 167-183.
- SCHULING, R. D. & OOSTEROM, M. G. (1967): *The metamorphic complex on Naxos (Greece) and the strontium and barium content of its carbonate rocks* – Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Series B: Palaeontology, Geology, Physics, Chemistry, Anthropology, **70**(2): 165-175.
- SCHULZ (1949): *A direct method of determining preferred orientation of a flat reflection sample using a Geigercounter x-ray spectrometer* – Journal of Applied Physics, **20**: 1030 ff.
- SCHWANDNER, E. L. (1990): *Ein monumentaler dorischer Marmortempel* – In: Hermogenes und die hochhellenistische Architektur von Pergamon, 41-43, Mainz
- SCHWARZ, T. & GERMANN, K. (1994): *Lateritization Processes and Supergene Ore Formation* – Catena Spec, **21**(2/3): 97-290.
- SEIM, R. & TISCHENDORF, G. (Hrsg.) (1990): *Grundlagen der Geochemie*, - Dt. Verlag für Grundstoffind., Leipzig, 632 S.
- SENGÖR, A. M. C. & YILMAZ, Y. (1981): *Tethyan evolution of Turkey: a plate-tectonic approach* – Tectonophysics, **75**: 181-241.
- SHEPPARD, S. & SCHWARCZ, H. P. (1970): *Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting metamorphic calcite and dolomite* – Contributions to Mineralogy and Petrology, **26**: 161-198.
- SHEREMETI-KABASHI, F. (2002): *Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung*, Dissertation Universität München.
- SIEGESMUND, S., WEISS, T., VOLLBRECHT, A. & ULLEMEYER, K. (1999): *Marble as a natural building stone; rocks fabrics, physical and mechanical properties* – In: VOSSMERBAEUMER, H. (Hrsg.) *Marmorkonservierung*, Vol. 150; 2, 237-257, Stuttgart (Verlag Ferdinand Enke).
- SIEGESMUND, S., ULLEMEYER, K., WEISS, T. & TSCHEGG, E. K. (2000): *Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion* – International Journal of Earth Sciences, **89**: 170-182.
- SIMON, S. (2001): *Zur Verwitterung und Konservierung kristallinen Marmors. Untersuchungen zu physiko-mechanischen Gesteinskennwerten, zur Oberflächenchemie von Calcit und zur Anpassung und Überprüfung von Gesteinsschutzmitteln*, Dissertation, Ludwig-Maximilian-Universität, München.
- SIMSEK, S. (2003): *Hydrogeological and isotopic survey of geothermal fields in the Buyuk Menderes graben, Turkey* – Geothermics, **32**(4-6): 669-678.
- SINGH, C., SINGH, T., KUMAR, A. & MUDAHAR, G. S. (2004): *Energy and chemical composition dependence of mass attenuation coefficients of building materials* – Annals of Nuclear Energy, **31**(10): 1199-1205.
- SMITH, A. H. (1900): *The Mausoleum and sculptures of Halicarnassos and Priene in the British museum*, London, 65 -163 S.
- SODINI, J.-P. (2002): *Marble and Stoneworking in Byzantium, Seventh–Fifteenth Centuries* – In: LAIOU, A. E. (Hrsg.) *The Economic History of Byzantium: From the Seventh through the Fifteenth Century*, 129-146, Washington, D.C (Dumbarton Oaks Research Library and Collection).
- SPATHIS, P., KARAGIANNIDOU, E. & MAGOULA, A. E. (2003): *Influence of titanium dioxide pigments on the photodegradation of paraloid acrylic resin* – Studies in Conservation, **48**(1): 57-64.
- SPEARMAN, C. (1908): *The Method of "Right and Wrong Cases" (Constant Stimuli) Without Gauss Formulae* – Brit. J. Psychol., **2**: 227-242.

- STAMATAKIS, M. G. (1988): *Building stones from the ancient quarries of Agiades area, Samos Island, Greece* – In: MARINOS PAUL, G. & KOUKIS GEORGE, C. (Hrsg.) *The engineering geology of ancient works, monuments and historical sites; preservation and protection--La geologie de l'ingenieur appliquee aux travaux anciens, monuments et sites historiques; preservation et protection.*, 2043-2047, Rotterdam, Netherlands (A. A. Balkema).
- STAMATAKIS, M. G. (1989): *A boron-bearing potassium feldspar in volcanic ash and tuffaceous rocks from Miocene lake deposits, Samos Island, Greece* – *American Mineralogist*, **74**(1-2): 230-235.
- STAMATAKIS, M. G. & ECONOMOU, G. S. (1991): *A colemanite and ulexite occurrence in a late Miocene saline-alkaline lake of West Samos Island, Greece* – *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, **86**(1): 166-172.
- STAMATAKIS, M. G., HALL, A. & HEIN, J. R. (1996): *The zeolite deposits of Greece* – *Mineralium Deposita*, **31**(6): 473-481.
- STAVROPODIS, J. D. (1977): *Ancient marbles of Greece*, Manuskript Vortrag im Deutschen Bergbaumuseum Bochum am 2. 12. 1977 - Nuclear Research Center "Democritos", Athen - Bochum, 16 S.
- STERFLINGER, K. (1995): *Geomicrobiological investigations on the alteration of marble monuments by dematiaceous fungi (Sanctuary of Delos, Cyclades, Greece)*, Oldenburg, 137 S.
- STERFLINGER, K., KRUMBEIN, W. E. & RULLKOETTER, J. (1999): *Patination of marble, sandstone and granite by microbial communities* – In: VOSSMERBÄUMER, H. (Hrsg.) *Marmorkonservierung*, Vol. 150; 2, 299-311, Stuttgart (Ferdinand Enke).
- STRUMPF, N. & DUERR, S. (1992): *Die Migmatite der Kykladen-Insel Naxos / Griechenland* – In: 4. Symposium Tektonik, Strukturgeologie, Kristallinegeologie; 26. - 28. März 1992; TSK IV., Vol. 11, 304-308, Frankfurt (Fachbereich Geowissenschaften der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt).
- STRUMPF, N. & ENGEL, M. (1996): *Die Metabasite von Naxos (Kykladen, Griechenland) - Geochemie als Hilfsmittel palaeotektonischer Rekonstruktionen* – In: FELDMANN, L. & QUADE, H. (Hrsg.) *Der Untergrund der Norddeutschen Tiefebene; Materialien zur 5. Jahrestagung*, Clausthal-Zellerfeld, 8.-12.05.1996., Vol. 197, 76-77, Berlin (Gesellschaft fuer Geowissenschaften).
- STRUMPF, N. (1997): *Das Kernkristallin von Naxos (Kykladen, Griechenland); 21 Tabellen*, 5, Verl. d. Ges. f. Geowiss., Berlin, 140 S.
- STRUMPF, N. & ENGEL, M. (1997): *Geochemie der Metabasite des Kristallins von Naxos (Kykladen, Griechenland)* – *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften*, **25**(5-6): 523-539.
- TAKAOGLU, T. (2001): *A late chalcolithic marble workshop at Kulaksizlar in Western Anatolia: an analysis of production and craft specialization*, Dissertation Boston University . Dept. of Archaeology, 392 S.
- TEGETHOFF, F. W., ROHLER, J. & KROKER, E. (2001): *Calciumcarbonat, von der Kreidezeit ins 21. Jahrhundert*, Birkhäuser Verlag, Basel ; Boston, Berlin, 324 S.
- TEXIER, C. (1839): *Déscription de l' Asie Mineure I*, 146 ff.
- THEOFILOPOULOS, D. K. (1990): *The geology of Paros; metamorphism and granitization of the Lefkes area* – *Deltio tes Ellenikes Geologikes Etaireias = Bulletin of the Geological Society of Greece*, **21**: 121-133.
- THEYE, T. & OCKENGA, E. (1988): *Diaspor+Quarz in Metabauxiten von Amorgos (Kykladen, Griechenland)* – In: Referate der Vortraege und Poster; 66. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft., Vol. 66; 1, 156, Stuttgart, Federal Republic of Germany (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- TOLLUOGLU, A. U., ERKAN, Y., SUMER, E. O., BOYACI, M. N. & BEKTAS, Y. F. (1997): *The Pre-Mesozoic metamorphic evolution of the Afyon metasedimentary group* – *Geological Bulletin of Turkey*, **40**(1): 1-14.
- TOLLUOGLU, A. U. & SUMER, E. O. (1997): *Afyon metasedimanter grubu'nda felsik metavulkanitlerin petrografik ve jeokimyasal ozellikleri* – *Yerbilimleri*, **19**: 57-70.
- TONIOLO, L., COLOMBO, C., REALINI, M., PERAIO, A. & POSITANO, M. (2001): *Evaluation of barium hydroxide treatment efficacy on a dolomitic marble* – *Annali Di Chimica*, **91**(11-12): 813-821.
- TORNARI, V., ZAFIROPOULOS, V., BONAROU, A., VAINOS, N. A. & FOTAKIS, C. (2000): *Modern technology in artwork conservation: a laser-based approach for process control and evaluation* – *Optics and Lasers in Engineering*, **34**(4-6): 309-326.
- TRAVLOS, J. (1971): *Bildlexikon zur Topographie des antiken Athen*, Wasmuth, Tübingen, 590 S.
- TRIKKALINOS, J. (1947): *Über die obere Kreidetransgression auf den kristallinen Schichten der Insel Paros* – In: *Annales Geologiques des Pays Helleniques*, Vol. 1, 1-6, Athens

- TRÖGER, W. E. (1982): *Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- TUCHELT, K. F. (1970): *Die archaischen Skulpturen von Didyma – Istanbuler Forschungen*, **27**: 247 S.
- TYKOT, R. H. & HERRMANN JR., J. J. (2003): *Gray marble sculpture in the Montemartini (Capitoline) Museum, Rome* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- UNDERWOOD, E. E. (1970): *Quantitative Stereology*, Addison-Wesley Publ. Corp.
- UNTERWURZACHER, M., STADLER, H., FRANZEN, C. & MIRWALD, P. (2003): *Provenance study of roman marble artefacts of an excavation near Oberdrauburg (Carinthia / Austria)* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts
- URAI, J. L. & FEENSTRA, A. (2001): *Weakening associated with the diaspore-corundum dehydration reaction in metabauxites: an example from Naxos (Greece)* – *Journal of Structural Geology*, **23**(6-7): 941-950.
- UZ, B. & TANYOLU, E. (1985): *Etude geochemique des formations metamorphiques et granitiques de l'Ile de Marmara (Balikesir, Turquie)* – *Istanbul Teknik Universitesi Bulteni*, **38**(2): 167-184.
- VALLEY, J. W. (1986): *Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks* – In: *Reviews in Mineralogy - Stable isotopes in high temperatures geological processes*, Vol. 16, 445-489, (Mineralogical Society of America).
- VERGARA, L., GOSALBEZ, J., FUENTE, J. V., MIRALLES, R., BOSCH, I., SALAZAR, A., LOPEZ, A. M. & DOMINGUEZ, L. E. (2004): *Ultrasonic nondestructive testing on marble rock blocks* – *Materials Evaluation*, **62**(1): 73-78.
- VERGES-BELMIN, V., KAUTEK, W. & KÖNIG, E. (Hrsg.) (1995): *LACONA I : Lasers in the Conservation of Artworks, 4-6 October 1995, Heraklion, Crete, Greece*, - Mayer & Comp., Wien, 118 S.
- VLASOV, D. Y. & ZELENSKAYA, M. S. (2003): *Micromycetes development on the rock substrate in experimental conditions* – *Mikologiya I Fitopatologiya*, **37**(6): 33-38.
- WADA, H., ANDO, T. & SUZUKI, M. (1998): *The role of the grain boundary at chemical and isotopic fronts in marble during contact metamorphism* – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **132**(4): 309-320.
- WAELEKENS, M. (1988): *Production patterns of sarcophagi in Phrygia* – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble : geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 139-143, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- WAELEKENS, M., DE PAEPE, P. & MOENS, L. (1988): *Quarries and the marble trade in antiquity* – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble: geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 11-28, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- WAELEKENS, M. (1992): *Bronze age quarries and quarrying techniques in the Eastern Mediterranean and the Near East* – In: WAELEKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (Hrsg.) *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 5-20, Leuven (Leuven University Press).
- WALL, F. & MARIANO, A. N. (1996): *Rare earth minerals in carbonatites: a discussion centred on the Kangankunde Carbonatite, Malawi* – In: JONES, A. P., WALL, F. & WILLIAMS, C. T. (Hrsg.) *Rare Earth Minerals - Chemistry, origin and ore deposits*, 193-225, London (Chapman & Hall).
- WASHINGTON, H. S. (1898): *The identification of the marbles used in Greek sculpture* – *American Journal of Archaeology*, **2**: 1-18.
- WASSERWIRTSCHAFTSAMT BAYREUTH (2004): *Geologische Besonderheiten im Amtsbezirk des Wasserwirtschaftsamtes Bayreuth* – <<http://www.bayern.de/wwa-bt/trinkwasser/seiten/geobes.htm>> eingesehen 3.5.2004
- WATZINGER, C. (1903): *Das Relief des Archelaos von Priene*, G. Reimer, Berlin, 24 S.
- WEBB, P. A. (1996): *Hellenistic Architectural Sculpture, Figural Motifs in Western Anatolia and the Aegean Islands* –
- WEDEPOHL, K. H. (1970): *Geochemische Daten von sedimentären Karbonaten und Karbonatgesteinen in ihrem faziellen und petrogenetischen Aussagewert* – *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt (Wien)*, **4**: 692-705.
- WEISE, C. (Hrsg.) (1998): *Calcit: das formenreichste Mineral der Erde*, -, München.

- WEISS, T., LEISS, B., OPPERMAN, H. & SIEGSMUND, S. (1999): *Microfabric of fresh and weathered marbles; implications and consequences for the reconstruction of the Marmorpalais Potsdam* – In: VOSSMERBAEUMER, H. (Hrsg.) *Marmorkonservierung*, Vol. 150; 2, 313-332, Stuttgart (Verlag Ferdinand Enke).
- WENNER, D. B., HAVERT, S. & CLARK, A. (1988): *Variations in stable isotopic compositions of marble: An assesment of Causes* – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble : geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 325-338, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- WIEGAND, T. & SCHRADER, H. (1904): *Priene: Ergebnisse der Ausgrabungen und Untersuchungen in den Jahren 1895-1898*, G. Reimer, Berlin, 492 S.
- WIEGAND, T. (1910): *Priene, ein Begleitwort zur Rekonstruktion von A. Zippelius*, B. G. Teubner, Leipzig, 28 S.
- WIEGAND, T. (1911): *Erster vorläufiger Bericht über die von den Königlichen Museen unternommenen Ausgrabungen in Samos*, Königl. Akademie der Wissenschaften : in Kommission bei G. Reimer, Berlin, 24 , 1 fold. leaf of plates S.
- WIJKERSLOOTH, P. D. (1944): *Afyon-Karahisarla Kayseri arasindaki Torosun ic kenarindaki genç volkanik sahareler - Über den jungen Vulkanismus am Innenrande des Taurus zwischen Afyon-Karahisar und Kayseri (Türkei)* – *Maden tetkik ve arama*, **9**: 244-256.
- WILL, T. (1996): *Phasenpetrologische Modellierungen im System NCFMASH, mit Anwendung auf polymetamorphe Gesteine der Insel Samos, Griechenland* – In: *Referate der Vorträge und Poster*; 74. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Vol. 1, 311, Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- WILL, T., OKRUSCH, M., SCHMAEDICKE, E. & CHEN, G. (1998): *Phase relations in the greenschist-blueschist-amphibolite-eclogite facies in the system Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (NCFMASH), with application to metamorphic rocks from Samos, Greece* – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **132**(1): 85-102.
- WINKLER, B., HYTHA, M., PICKARD, C., MILMAN, V., WARREN, M. & SEGALL, M. (2001): *Theoretical investigation of bonding in diaspor* – *European Journal of Mineralogy*, **13**: 343-349.
- WINKLER, E. M. (1994): *Stone in Architecture - Properties, Durability*, Springer-Verlag, Berlin etc., 313 S.
- WINNEFELD, H. (1910): *Die Friese des Großen Altars* – *Altertümer von Pergamon*, **III**(2).
- WINTER, F. (1908): *Die Skulpturen mit Ausnahme der Altarreliefs* – *Altertümer von Pergamon*, **7**(1): 3-8.
- WIPPERN, J. (1964): *Die Aluminium-Rohstoffe in der Tuerkei* – *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, **62**: 83-90.
- WOELFEL, W. v. (1996): *Die Eupalinos-Wasserleitung von Samos* – *Bautechnik*, **73**(2): 121-123.
- WONG, H. K., LUEDMANN, T., ULUG, A. & GORUR, N. (1995): *The Sea of Marmara; a plate boundary sea in an escape tectonic regime* – *Tectonophysics*, **244**(4): 231-250.
- WURCH-KOZELJ, M. (1988): *Methods of transporting blocks in antiquity* – In: HERZ, N. & WAELEKENS, M. (Hrsg.) *Classical marble : geochemistry, technology, trade*, Vol. 153, 55-64, Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- WURCH-KOZELJ, M. & KOZELJ, T. (1995): *Roman quarries on Apse-Sarcophagi in Thassos of the second and third centuries* – In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (Hrsg.) *The Study of Marble and Other Stones Used in Antiquity*, 39-47, London (Archetype Publications).
- WYSS, W. v. (1912): *Priene bei Milet - das Pompei Kleinasiens*, Zürcher & Furrer, Zürich, 40 S.
- YALÇIN, Ü. (1987): *Petrologie und Geochemie der Metabauxite SW-Anatoliens*, Dissertation, Bochum, 136 S.
- YALTIRAK, C. (2002): *Tectonic evolution of the Marmara Sea and its surroundings* – *Marine Geology*, **190**(1): 493-529.
- YANG, X. M., YANG, X. Y., ZHENG, Y. F. & LE BAS, M. J. (2003): *A rare earth element-rich carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China* – *Mineralogy and Petrology*, **78**(1-2): 93-110.
- YILMAZ, H. (2002): *Ovacik gold deposit; an example of quartz-adularia-type gold mineralization in Turkey* – *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, **97**(8): 1829-1839.
- YUCEL, Y. & DEMIR, C. (2004): *Principal component analysis and cluster analysis for the characterisation of marbles by capillary electrophoresis* – *Talanta*, **63**(2): 451-459.
- YÜZER, E., ERDOGAN, M. & ERIS, I. (1992): *Economic marble fields and recent developments in dimension stone production of Turkey* – In: *International Ankara marble symposium - abstracts*. Ankara (Tmmob Chamber of Geological Engineers).

- YÜZER, E., ERGIN, H. & TUGRUL, A. (Hrsg.) (2003): *Industrial minerals and building stones : September 15-18, 2003 Istanbul Turkey*, - IAEG, Istanbul, 931 S.
- ZACHARIAH, J. K. (1998): *A 3.1 billion year old marble and the Sr-87/Sr-86 of late-Archean seawater* – Terra Nova, **10**(6): 312-316.
- ZANARDINI, E., ANDREONI, V., BORIN, S., CAPPITELLI, F., DAFFONCHIO, D., TALOTTA, P., SORLINI, C., RANALLI, G., BRUNI, S. & CARIATI, F. (1997): *Lead-resistant microorganisms from red stains of marble of the Certosa of Pavia, Italy and use of nucleic acid-based techniques for their detection* – International Biodeterioration & Biodegradation, **40**(2-4): 171-182.
- ZANARDINI, E., ABBRUSCATO, P., GHEDINI, N., REALINI, M. & SORLINI, C. (2000): *Influence of atmospheric pollutants on the biodeterioration of stone* – International Biodeterioration & Biodegradation, **45**(1-2): 35-42.
- ZIMMERMANN, B., JANSEN, B. & JOHANNES, W. (1974): *Zusammensetzung der Plagioklase in metamorphen Gesteinen von Naxos/ Griechenland* – Fortschritte der Mineralogie. 52, Suppl, **2**(52. Jahrestag. Deutsch. Mineral. Ges.): 80-82.
- ZÖLDFÖLDI, J. & SATIR, M. (2002): *Provenance of the White Marble Building Stones in the Monuments of Ancient Troja* – In: WAGNER, G., PERNICKA, E. & UERPMMANN, H.-P. (Hrsg.) Troia and the Troad. Scientific Approaches, 203-222, (Springer Verlag - Heidelberg).
- ZULAUF, J. & ZULAUF, G. (2004): *Rheology of plasticine used as rock analogue: the impact of temperature, composition and strain* – Journal of Structural Geology, **26**(4): 725-737.
- ZULIANI, F. (1969): *I marmi di San Marco; uno studio ed un catalogo della scultura ornamentale marciana fino all'XI secolo*, Centro internazionale delle arti e del costume, Venezia, 186 S.

10 Anhang

10.1 Anhangsverzeichnis

10.2	Praktische Nutzung von MarbExpert.....	296
10.3	Anzahl von verwerteten Proben aus Lagerstätten und von Museumsobjekten	297
10.4	ICP-MS: A: Bestimmungsgrenzen (BG, µg/g), bezogen auf Feststoff	299
10.5	ICP-MS: B: Blindwert (BW, µg/g), bezogen auf Feststoff	299
10.6	ICP-MS: D: Reproduzierbarkeit der Messung (µg/g) bezogen auf Feststoff.....	301
10.7	ICP-MS: Messwerte von Standards (Carrara Marmor (GFZ) und Limestone (IAG) 304	
10.8	ICP-MS: Driftkontrolle von Proben und GSJ Dolomit-Standard bei Verdünnungsfaktor 1000 und 5000.....	305
10.9	ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000 xl: Blindwerte-, Standard- tw. Probenmessung.....	309
10.10	ICP-OES: Kontrollmessung certifi. Wasser-Standard SRM 1640 in Ca-Matrix-Lsg.	312
10.11	Vergleich GFZ (ICP-MS)-----AWI (ICP-OES) für Ba + Sr	313
10.12	Isotopenmessung am AWI: Standard KH-2 und Proben (Auszug)	315
10.13	Korrelationen (PEARSON, 1966) der geochemischen Messwerte	317
10.14	Datensätze der Proben mit wichtigsten erfaßten Merkmalen	318
10.15	Zuordnung von Lagerstätten- und Museumsmarmoren durch Diskriminanzanalyse, antike Objekte in Fettdruck.....	329
10.16	Publikationsliste	332
10.17	Curriculum vitae	333

10.2 Praktische Nutzung von MarbExpert

- Auf Anfrage an cramer@bg.tu-berlin.de werden die Dateien marmor14.qst und marmor14.dat per E-mail zugeschickt.
- Auf der Homepage <http://www.esbuilder.com> kann das Programm heruntergeladen und auf den eigenen PC installiert werden. Die Nutzung ist 30 Tage lang kostenlos und kann für einen Betrag von z.Zt 18 US-Dollar unbegrenzt freigeschaltet werden. Die beiden Dateien können z.B. in ein Verzeichnis /marble gespeichert werden. Sie wurde mit der Version 4.2.2 erstellt, aber funktionieren auch mit der aktuellen Version 4.3 problemlos.
- Die Dateien können im User-Interface unverändert verwendet, aber auch den eigenen Bedürfnissen angepaßt werden. Denkbar ist z.B. die Löschung von für die Fragestellung irrelevanten Lagerstätten und die Hinzufügung eigener Datensätze. Dabei empfiehlt sich unbedingt die vorherige Abspeicherung der Originaldateien in einem Extraverzeichnis. Jede Veränderung sowohl der Datenbasis als auch im Question-Editor kann unvorhersehbare Folgen haben, unter anderem, da die Ursprungsdateien überschrieben werden. Die einzelnene Datensätze müssen anschließend überprüft und gegebenenfalls neu justiert werden.
- Eine Haftung oder Gewährleistung meinerseits ist ausdrücklich ausgeschlossen.

10.3 Anzahl von verwerteten Proben aus Lagerstätten und von Museumsobjekten

		Probenanzahl	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Lagerstätten	Afro	15	2,5	2,6	2,6
	BGaq	12	2,0	2,1	4,7
	Saricay	3	,5	,5	5,2
	Eurom	10	1,7	1,7	6,9
	Hk	12	2,0	2,1	9,0
	MTO	14	2,4	2,4	11,4
	MT W	17	2,9	2,9	14,3
	BGBuAd	8	1,3	1,4	15,7
	10	1	,2	,2	15,9
	11	1	,2	,2	16,0
	Car	12	2,0	2,1	18,1
	Delion	3	,5	,5	18,6
	Eph	7	1,2	1,2	19,8
	Hym	2	,3	,3	20,2
	Lasa	2	,3	,3	20,5
	Mugla	3	,5	,5	21,0
	MgLs	4	,7	,7	21,7
	Milas	10	1,7	1,7	23,4
	Marmara	61	10,3	10,5	34,0
	MyLS_28	2	,3	,3	34,3
	MyLS_3	2	,3	,3	34,7
	MyLS_4	3	,5	,5	35,2
	NB_Ak	6	1,0	1,0	36,2
	NB_EM	5	,8	,9	37,1
	Nx	35	5,9	6,0	43,1
	ParLy	14	2,4	2,4	45,5
	ParKa	1	,2	,2	45,7
	ParPa	1	,2	,2	45,9
	ParEMT	21	3,5	3,6	49,5
	ParPy	2	,3	,3	49,8
	ParMarat	7	1,2	1,2	51,0
	ParSiph	3	,5	,5	51,6
	ParWMt	35	5,9	6,0	57,6
	Pent	5	,8	,9	58,4
Pri Ls	12	2,0	2,1	60,5	
ThaCry	1	,2	,2	60,7	
ThaAl	2	,3	,3	61,0	
ThaPri	1	,2	,2	61,2	
TheAx	5	,8	,9	62,1	
TheKas	1	,2	,2	62,2	
TheTemb	1	,2	,2	62,4	
TheTrik	2	,3	,3	62,8	
Wuns	2	,3	,3	63,1	
Museumsobjekte	Dy aCc	3	,5	,5	63,6
	Dy aKap	2	,3	,3	64,0
	Dy Dok	1	,2	,2	64,1
	Dy Kouros	3	,5	,5	64,7

		Probenanzahl	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
	Dy Nais	4	,7	,7	65,3
	Dy Steing	1	,2	,2	65,5
	Ef Ht	3	,5	,5	66,0
	AthEum	3	,5	,5	66,6
	GF_106/E	1	,2	,2	66,7
	GF_109E_car	1	,2	,2	66,9
	GF_111/E_ws	1	,2	,2	67,1
	GF	59	9,9	10,2	77,2
	Kae gr	3	,5	,5	77,8
	Kos	1	,2	,2	77,9
	Lon	5	,8	,9	78,8
	Mg ArtAl	2	,3	,3	79,1
	Mg ArtK	3	,5	,5	79,7
	Mg ArtSi	19	3,2	3,3	82,9
	MT DeKy	1	,2	,2	83,1
	MT DePl	1	,2	,2	83,3
	MT DeVo	1	,2	,2	83,4
	MT Faust	1	,2	,2	83,6
	MT Mat	4	,7	,7	84,3
	MT Rank	4	,7	,7	85,0
	MT RH	1	,2	,2	85,2
	MT_Boul-MT39	1	,2	,2	85,3
	MT_Ion_MT36	1	,2	,2	85,5
	MT_St_Ort-MT35	1	,2	,2	85,7
	MT_Theat_y	1	,2	,2	85,9
	MT_Heroon I_y	1	,2	,2	86,0
	MT_Hafenmon_Y	1	,2	,2	86,2
	MT_Hafenmon_2Y	1	,2	,2	86,4
	MT_Heroon II_y	1	,2	,2	86,6
	MT_Boul_Y	1	,2	,2	86,7
	MT_S_Mator_Y	1	,2	,2	86,9
	MT_Heroon III_y	1	,2	,2	87,1
	My_Gel	3	,5	,5	87,6
	My Mtr	3	,5	,5	88,1
	My Wg	3	,5	,5	88,6
	Pg ATWf	9	1,5	1,6	90,2
	Pg DeT	4	,7	,7	90,9
	Pg DiT	5	,8	,9	91,7
	Pg Kou	2	,3	,3	92,1
	Pg MarS	5	,8	,9	92,9
	Pg MaTpl	3	,5	,5	93,4
	Pg Tha	2	,3	,3	93,8
	Pri AT	1	,2	,2	94,0
	SamHer	3	,5	,5	94,5
	TF	30	5,1	5,2	99,7
	TroAT	2	,3	,3	100,0
	Gesamt	580	97,6	100,0	
Fehlend	System	14	2,4		
Gesamt		594	100,0		

In jeder Aufschlußserie wurden 13 Proben und eine Referenzprobe aufgeschlossen sowie zwei Blindaufschlüsse (BW und Merck) durchgeführt. 0.2 g Probe wurde mit 10 ml Salpetersäure (subboiled, 6 Mol/l) im Schüttelwasserbad bei 75 °C innerhalb von zwei Stunden aufgeschlossen. Die im allgemeinen klare Lösung wurde filtriert, in einen 50 ml Meßkolben (Glas) überführt und mit Reinstwasser (Milli-Q, 18 MO, Millipore) aufgefüllt. Für die Messung wurden die Lösungen mit 0.5 Mol/l HNO₃ 1:10 verdünnt (Gesamtverdünnungsfaktor VF=2500) und mit Ru/Re als interne Standards versetzt.

10.4 ICP-MS: A: Bestimmungsgrenzen (BG, µg/g), bezogen auf Feststoff

An jedem Meßtag wurden 13 Säureblanks im Zeitraum von ca 10 Stunden gemessen

Die Bestimmungsgrenze berechnet sich als die zehnfache Standardabweichung der 13 Einzelmessungen (10 σ)

mean: Mittelwert, sd: Standardabweichung (1 σ), rsd: relative Standardabweichung

Messung	Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
29.10.2002	BG-1	0,117	0,021	0,012	0,020	0,007	0,058	0,013	0,013	0,009	0,042	0,022	0,008	0,015	0,008	0,018	0,007	0,010	0,007	0,012	0,006	0,012	0,035	0,006	0,005
30.10.2002	BG-2	0,086	0,037	0,015	0,018	0,007	0,078	0,008	0,011	0,011	0,038	0,028	0,012	0,014	0,007	0,022	0,007	0,013	0,007	0,013	0,005	0,019	0,029	0,006	0,005
31.10.2002	BG-3	0,097	0,038	0,025	0,056	0,022	0,240	0,025	0,023	0,017	0,144	0,105	0,028	0,054	0,014	0,067	0,014	0,042	0,013	0,057	0,012	0,065	0,037	0,013	0,010
28.04.2003	BG-4	0,048	0,035	0,010	0,020	0,021	0,043	0,012	0,009	0,010	0,023	0,017	0,007	0,011	0,005	0,009	0,004	0,011	0,005	0,010	0,005	0,027	0,017	0,011	0,008
29.04.2002	BG-5	0,360	0,076	0,021	0,024	0,036	0,114	0,021	0,021	0,017	0,065	0,051	0,018	0,033	0,014	0,030	0,013	0,028	0,012	0,032	0,010	0,028	0,056	0,016	0,020
05.05.2003	BG-6	0,124	0,044	0,011	0,014	0,008	0,048	0,007	0,009	0,006	0,017	0,013	0,007	0,012	0,005	0,006	0,006	0,009	0,004	0,009	0,005	0,008	0,012	0,004	0,009
24.07.2003	BG-7	0,128	0,060	0,012	0,016	0,009	0,057	0,014	0,018	0,010	0,046	0,007	0,011	0,033	0,006	0,017	0,007	0,011	0,007	0,011	0,008	0,026	0,023	0,015	0,012
28.07.2003	BG-8	0,159	0,088	0,020	0,028	0,012	0,181	0,022	0,025	0,013	0,092	0,057	0,020	0,043	0,015	0,033	0,011	0,025	0,011	0,049	0,010	0,045	0,042	0,016	0,010
Mean		0,140	0,050	0,016	0,025	0,015	0,102	0,015	0,016	0,012	0,059	0,038	0,014	0,027	0,009	0,025	0,009	0,019	0,008	0,024	0,008	0,029	0,031	0,011	0,010
Sd		0,095	0,023	0,006	0,013	0,010	0,072	0,007	0,007	0,004	0,042	0,032	0,008	0,016	0,004	0,019	0,003	0,012	0,003	0,019	0,003	0,018	0,014	0,005	0,005
rsd(%)		68	46	36	55	67	70	42	42	34	72	86	55	61	44	75	40	64	37	79	37	64	45	47	50

10.5 ICP-MS: B: Blindwert (BW, µg/g), bezogen auf Feststoff

Zu jeder Aufschlußserie wurden zwei Blindaufschlüsse (Methodenblindwerte) durchgeführt. Der erste (BW) wurde ohne jegliche Probe ausgeführt, während beim zweiten Blindaufschluß (Merck) synthetisches Kalziumkarbonat (CaCO₃ s.p.) verwendet wurde, um mögliche Matrixeffekte zu überprüfen. mean: Mittelwert, sd: Standardabweichung (1 s), rsd: relative Standardabweichung

Aufschluß	Messung	Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
11.09.2002	29.10.2002	BW-01	<BG	0,041	<BG	0,020	<BG	0,098	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,044	<BG	<BG
11.09.2002	29.10.2002	BW-02	<BG	0,041	<BG	0,082	<BG	0,144	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,043	<BG	<BG
11.09.2002	30.10.2002	BW-03	<BG	<BG	<BG	0,765	<BG	0,223	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,021	0,217	<BG	<BG
08.10.2002	30.10.2002	BW-04	<BG	<BG	<BG	0,028	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	1,45	<BG	<BG
09.10.2002	31.10.2002	BW-05	<BG	<BG	<BG	0,638	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,723	<BG	<BG
10.10.2002	31.10.2002	BW-06	<BG	<BG	<BG	0,113	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,395	<BG	<BG
11.10.2002	28.04.2003	BW-07	<BG	0,060	<BG	0,110	<BG	0,125	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,565	<BG	<BG

Aufschluß	Messung	Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U	
15.10.2002	28.04.2003	BW-08	<BG	<BG	<BG	0,328	<BG	0,058	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	1,085	<BG	<BG	
16.10.2002	29.04.2003	BW-09	<BG	<BG	<BG	0,329	<BG	0,122	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,736	<BG	<BG	
16.10.2002	29.04.2003	BW-10	<BG	<BG	<BG	0,155	<BG	0,182	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,915	<BG	<BG	
17.10.2002	05.05.2003	BW-11	<BG	<BG	<BG	0,192	<BG	0,220	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	1,629	<BG	<BG	
17.10.2002	05.05.2003	BW-12	<BG	<BG	<BG	0,077	<BG	0,057	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,125	<BG	<BG	
22.10.2002	24.07.2003	BW-13	<BG	<BG	<BG	0,350	<BG	0,192	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,086	<BG	<BG	
23.10.2002	24.07.2003	BW-14	<BG	0,257	<BG	0,353	<BG	6,753	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	1,999	<BG	<BG	
24.10.2002	28.07.2003	BW-15	<BG	<BG	<BG	0,275	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	0,135	<BG	<BG	
mean				0,100		0,254		0,743																0,021	0,676		
sd				0,105		0,217		1,994																	0,628		
rsd(%)				105		85		268																	93		
Aufschluß	Messung	Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U	
11.09.2002	29.10.2002	Merck-01	<0.1	12,3	<0.01	<0.02	<0.007	3,58	<0.02	0,564	<0.009	<0.04	<0.02	<0.008	<0.02	<0.008	<0.02	<0.007	<0.01	<0.007	<0.01	<0.006	<0.01	0,13	<0.006	<0.005	
11.09.2002	29.10.2002	Merck-02	<0.1	12,2	<0.01	0,022	<0.007	3,54	<0.02	0,583	<0.009	<0.04	<0.02	<0.008	<0.02	<0.008	<0.02	<0.007	<0.01	<0.007	<0.01	<0.006	<0.01	0,14	<0.006	<0.005	
11.09.2002	30.10.2002	Merck-03	<0.09	12,1	<0.02	0,469	<0.007	3,73	<0.008	0,572	<0.01	<0.04	<0.03	<0.01	<0.01	<0.007	<0.02	<0.007	<0.02	<0.007	<0.01	<0.005	<0.02	0,18	<0.006	<0.005	
08.10.2002	30.10.2002	Merck-04	<0.09	12,1	<0.02	0,071	<0.007	3,66	<0.008	0,585	<0.01	<0.04	<0.03	<0.01	<0.01	<0.007	<0.02	<0.007	<0.02	<0.007	<0.01	<0.005	<0.02	0,40	<0.006	<0.005	
09.10.2002	31.10.2002	Merck-05	<0.1	12,5	<0.03	0,603	<0.02	3,59	<0.03	0,564	<0.02	<0.1	<0.1	<0.02	<0.05	<0.01	<0.07	<0.01	<0.04	<0.01	<0.06	<0.01	<0.07	0,61	<0.01	<0.01	
10.10.2002	31.10.2002	Merck-06	<0.1	11,9	<0.03	<0.06	<0.02	3,60	<0.03	0,596	<0.02	<0.1	<0.1	<0.02	<0.05	<0.01	<0.07	<0.01	<0.04	<0.01	<0.06	<0.01	<0.07	0,39	<0.01	<0.01	
11.10.2002	28.04.2003	Merck-07	<0.05	11,8	<0.01	0,023	<0.02	3,38	<0.01	0,553	<0.01	<0.02	<0.02	<0.007	<0.01	<0.005	<0.009	<0.004	<0.01	<0.005	<0.01	<0.005	<0.03	0,31	<0.01	<0.008	
15.10.2002	28.04.2003	Merck-08	<0.05	12,7	<0.01	0,296	<0.02	4,04	<0.01	0,573	<0.01	<0.02	<0.02	<0.007	<0.01	<0.005	<0.009	<0.004	<0.01	<0.005	<0.01	<0.005	<0.03	1,19	<0.01	<0.008	
16.10.2002	29.04.2003	Merck-09	<0.4	12,5	<0.02	0,147	<0.03	3,45	<0.02	0,555	<0.02	<0.07	<0.03	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.02	<0.03	<0.02	<0.04	<0.01	<0.03	0,39	<0.02	<0.02	
16.10.2002	29.04.2003	Merck-10	<0.4	12,6	<0.02	1,162	<0.03	3,49	<0.02	0,539	<0.02	<0.07	<0.03	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.02	<0.03	<0.02	<0.04	<0.01	<0.03	1,76	<0.02	<0.02	
17.10.2002	05.05.2003	Merck-11	<0.2	12,5	<0.02	0,240	<0.008	3,51	<0.007	0,557	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	<0.006	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	<0.008	0,39	<0.004	<0.009	
17.10.2002	05.05.2003	Merck-12	<0.2	12,8	<0.02	0,332	<0.008	4,33	<0.007	0,555	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	<0.006	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	<0.008	0,41	<0.004	<0.009	
22.10.2002	24.07.2003	Merck-13	<0.1	12,5	<0.01	0,223	<0.009	4,19	<0.02	0,542	<0.01	<0.05	<0.007	<0.01	<0.04	<0.006	<0.02	<0.007	<0.01	<0.007	<0.01	<0.008	<0.03	0,20	<0.02	<0.01	
23.10.2002	24.07.2003	Merck-14	<0.1	13,3	<0.01	0,107	<0.009	4,15	<0.02	0,575	<0.01	<0.05	<0.007	<0.01	<0.04	<0.006	<0.02	<0.007	<0.01	<0.007	<0.01	<0.008	<0.03	0,32	<0.02	<0.01	
24.10.2002	28.07.2003	Merck-15	<0.2	12,5	<0.02	0,230	<0.01	3,55	<0.02	0,550	<0.01	<0.09	<0.06	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	0,14	<0.02	<0.01	
mean				12,42		0,302		3,72		0,564														0,5			
sd				0,39		0,309		0,30		0,016														0,4			
rsd (%)				3,2		102		8,1		2,9														96			

10.6 ICP-MS: D: Reproduzierbarkeit der Messung ($\mu\text{g/g}$) bezogen auf Feststoff

An jedem Meßtag wurden von einer Aufschlußlösung 50 ml Meßlösung hergestellt. Diese wurde im Verlaufe des Meßtages (ca. 10 Stunden) 9 mal gemessen.

mean: Mittelwert, sd: Standardabweichung (1σ), rsd: relative Standardabweichung

ICP-MS: D: Reproduzierbarkeit der Messung ($\mu\text{g/g}$) bezogen auf Feststoff																												
Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U	Y/Ho	Ce/Ce*	Eu/Eu*	
Chondrit(Taylor&McLennan)			1,56				0,235	0,603	0,089	0,452	0,147	0,056	0,197	0,036	0,243	0,056	0,159	0,024	0,163	0,024								
29/1	<0.1	203	2,42	0,040	<0.007	2,16	0,629	0,303	0,107	0,480	0,100	0,025	0,158	0,020	0,170	0,046	0,141	0,018	0,121	0,016	<0.01	0,805	0,011	0,020	53,0	0,38	0,70	
29/2	<0.1	203	2,38	0,042	<0.007	2,19	0,624	0,314	0,113	0,502	0,105	0,025	0,149	0,024	0,181	0,042	0,138	0,019	0,120	0,015	<0.01	0,809	0,011	0,017	57,3	0,36	0,62	
29/3	<0.1	201	2,37	0,042	<0.007	2,20	0,620	0,308	0,108	0,450	0,101	0,026	0,147	0,023	0,171	0,041	0,135	0,019	0,110	0,017	<0.01	0,808	0,010	0,018	57,5	0,36	0,71	
29/4	<0.1	201	2,34	0,038	<0.007	2,24	0,628	0,305	0,102	0,457	0,104	0,024	0,151	0,021	0,172	0,043	0,139	0,018	0,120	0,018	<0.01	0,826	0,011	0,020	54,5	0,40	0,63	
29/5	<0.1	200	2,36	0,042	<0.007	2,17	0,633	0,308	0,101	0,452	0,099	0,026	0,139	0,024	0,174	0,043	0,137	0,018	0,115	0,015	<0.01	0,811	0,011	0,019	54,3	0,40	0,68	
29/6	<0.1	200	2,37	0,034	<0.007	2,13	0,629	0,302	0,105	0,470	0,099	0,027	0,157	0,023	0,173	0,043	0,140	0,018	0,123	0,017	<0.01	0,814	0,012	0,019	54,6	0,38	0,72	
29/7	<0.1	203	2,41	0,045	<0.007	2,16	0,626	0,302	0,104	0,456	0,088	0,025	0,145	0,024	0,178	0,043	0,138	0,017	0,117	0,017	<0.01	0,821	0,011	0,016	56,5	0,38	0,72	
29/8	<0.1	202	2,38	0,041	<0.007	2,21	0,635	0,308	0,106	0,472	0,103	0,023	0,152	0,022	0,171	0,043	0,138	0,018	0,113	0,018	<0.01	0,799	0,011	0,019	55,5	0,38	0,63	
29/9	<0.1	204	2,40	0,045	<0.007	2,20	0,630	0,320	0,103	0,490	0,108	0,023	0,141	0,022	0,173	0,045	0,138	0,019	0,115	0,018	<0.01	0,803	0,012	0,019	53,7	0,43	0,60	
mean		202	2,38	0,041		2,18	0,628	0,308	0,105	0,47	0,101	0,025	0,149	0,023	0,174	0,043	0,138	0,018	0,117	0,017		0,811	0,011	0,019	55	0,39	0,67	
sd		1	0,02	0,003		0,03	0,005	0,006	0,004	0,02	0,006	0,001	0,007	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,004	0,001		0,009	0,001	0,001	2	0,02	0,05	
rsd(%)		0,6	1,0	7,7		1,5	0,7	1,9	3,4	3,8	5,7	5,2	4,4	6,5	2,0	3,2	1,1	4,1	3,7	7,0		1,1	6,1	6,7	2,9	5,7	7,1	
116/1	0,098	69,2	1,08	0,072	0,008	0,70	0,710	0,983	0,192	0,814	0,197	0,043	0,198	0,031	0,181	0,035	0,089	0,010	0,064	0,010	<0.02	1,00	0,120	0,113	30,7	0,65	0,66	
116/2	<0.09	68,4	1,05	0,085	0,010	0,71	0,717	0,981	0,186	0,820	0,189	0,047	0,201	0,030	0,169	0,033	0,088	0,011	0,064	0,009	<0.02	1,01	0,115	0,109	31,4	0,69	0,74	
116/3	<0.09	67,7	1,05	0,074	0,011	0,70	0,734	0,990	0,193	0,814	0,185	0,044	0,207	0,028	0,178	0,033	0,088	0,010	0,070	0,007	<0.02	1,01	0,110	0,111	31,6	0,65	0,71	
116/4	<0.09	67,7	1,03	0,087	0,010	0,70	0,747	0,994	0,194	0,809	0,187	0,046	0,202	0,032	0,181	0,032	0,096	0,012	0,070	0,009	<0.02	1,01	0,106	0,109	31,8	0,64	0,72	
116/5	<0.09	67,2	1,06	0,068	0,012	0,72	0,753	0,996	0,191	0,793	0,193	0,044	0,232	0,031	0,172	0,032	0,090	0,011	0,067	0,009	<0.02	0,99	0,105	0,108	32,6	0,65	0,67	
116/6	<0.09	68,6	1,05	0,080	0,012	0,73	0,736	1,001	0,197	0,848	0,195	0,044	0,216	0,029	0,183	0,031	0,097	0,011	0,063	0,009	<0.02	1,00	0,111	0,112	33,4	0,65	0,68	
116/7	<0.09	69,1	1,04	0,081	0,010	0,73	0,756	0,982	0,190	0,866	0,183	0,050	0,199	0,030	0,176	0,032	0,094	0,011	0,068	0,008	<0.02	1,02	0,103	0,118	32,4	0,69	0,81	
116/8	<0.09	68,2	1,06	0,077	0,010	0,74	0,746	0,998	0,190	0,821	0,196	0,043	0,206	0,029	0,177	0,033	0,097	0,010	0,066	0,008	<0.02	1,00	0,105	0,113	31,6	0,68	0,67	
116/9	<0.09	69,1	1,05	0,091	0,012	0,73	0,745	0,997	0,194	0,813	0,203	0,046	0,204	0,029	0,175	0,031	0,092	0,010	0,070	0,009	<0.02	0,99	0,110	0,110	33,6	0,65	0,70	
mean		68,3	1,05	0,079	0,010	0,72	0,74	0,991	0,192	0,82	0,192	0,045	0,21	0,030	0,177	0,033	0,092	0,011	0,067	0,009		1,00	0,109	0,111	32	0,66	0,71	
sd		0,7	0,01	0,008	0,001	0,02	0,02	0,008	0,003	0,02	0,006	0,002	0,01	0,001	0,004	0,001	0,004	0,001	0,003	0,001		0,01	0,005	0,003	1	0,02	0,05	
rsd(%)		1,1	1,3	9,5	12,6	2,5	2,1	0,8	1,6	2,7	3,3	4,9	5,2	4,5	2,4	3,6	3,9	5,2	4,0	11,5		1,0	4,9	2,7	3,0	2,8	6,4	
147/1	<0.1	85,7	3,19	0,103	<0.02	1,99	1,16	0,624	0,187	0,866	0,174	0,043	0,260	0,035	0,258	0,056	0,161	0,021	0,128	0,020	<0.07	1,12	0,031	0,060	56,8	0,45	0,68	
147/2	<0.1	83,8	3,11	0,102	<0.02	2,00	1,15	0,596	0,186	0,843	0,178	0,041	0,271	0,035	0,263	0,059	0,163	0,021	0,134	0,019	<0.07	1,11	0,029	0,056	52,7	0,43	0,65	
147/3	<0.1	84,3	3,16	0,100	<0.02	1,95	1,16	0,623	0,196	0,838	0,177	0,043	0,254	0,041	0,240	0,056	0,173	0,020	0,127	0,017	<0.07	1,13	0,029	0,056	56,5	0,41	0,66	

ICP-MS: D: Reproduzierbarkeit der Messung (µg/g) bezogen auf Feststoff

Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U	Y/Ho	Ce/Ce*	Eu/Eu*
147/4	<0.1	86,5	3,18	0,112	<0.02	2,00	1,17	0,638	0,192	0,844	0,180	0,042	0,248	0,037	0,262	0,050	0,171	0,023	0,127	0,019	<0.07	1,12	0,028	0,057	63,6	0,43	0,64
147/5	<0.1	84,7	3,10	0,109	<0.02	1,94	1,17	0,620	0,199	0,871	0,183	0,041	0,269	0,039	0,254	0,056	0,170	0,020	0,140	0,019	<0.07	1,09	0,028	0,060	55,1	0,40	0,61
147/6	<0.1	83,1	3,11	0,110	<0.02	2,07	1,15	0,626	0,199	0,865	0,190	0,043	0,258	0,037	0,262	0,056	0,171	0,021	0,137	0,017	<0.07	1,14	0,028	0,059	55,7	0,41	0,64
147/7	<0.1	80,9	3,07	0,122	<0.02	1,95	1,17	0,587	0,192	0,849	0,184	0,044	0,276	0,043	0,255	0,058	0,183	0,025	0,141	0,020	<0.07	1,12	0,028	0,057	52,5	0,40	0,65
147/8	<0.1	80,4	3,03	0,105	<0.02	2,05	1,14	0,620	0,196	0,854	0,201	0,048	0,281	0,040	0,258	0,060	0,175	0,020	0,144	0,021	<0.07	1,15	0,034	0,062	50,3	0,41	0,67
147/9	<0.1	80,3	3,03	0,109	<0.02	1,97	1,18	0,647	0,196	0,849	0,199	0,051	0,281	0,040	0,257	0,055	0,181	0,021	0,138	0,020	<0.07	1,14	0,036	0,060	54,6	0,42	0,72
mean		83	3,11	0,108		1,99	1,16	0,62	0,194	0,85	0,185	0,044	0,266	0,039	0,257	0,056	0,172	0,021	0,135	0,019		1,13	0,030	0,059	55	0,42	0,66
sd		2	0,06	0,007		0,04	0,01	0,02	0,005	0,01	0,009	0,003	0,012	0,003	0,007	0,003	0,007	0,002	0,006	0,001		0,02	0,003	0,002	4	0,02	0,03
rsd(%)		2,8	2,0	6,1		2,2	1,0	3,0	2,5	1,4	5,1	7,5	4,5	6,7	2,7	5,2	4,1	7,4	4,6	7,1		1,6	9,4	3,8	6,8	4,2	4,4
Ca2/1	0,061	131	0,305	0,188	<0.02	134	0,126	0,082	0,013	0,059	<0.02	interfered	<0.01	<0.005	0,016	<0.004	0,014	<0.005	0,014	<0.005	<0.03	0,818	0,027	0,032		0,852	
Ca2/2	<0.05	130	0,302	0,179	<0.02	135	0,133	0,080	0,012	0,056	<0.02	interfered	0,011	<0.005	0,012	<0.004	0,013	<0.005	0,012	<0.005	<0.03	0,819	<0.01	0,034		0,876	
Ca2/3	<0.05	129	0,308	0,173	<0.02	136	0,130	0,079	0,012	0,048	<0.02	interfered	<0.01	<0.005	0,014	<0.004	0,012	<0.005	0,015	<0.005	<0.03	0,806	<0.01	0,034		0,845	
Ca2/4	<0.05	125	0,296	0,179	<0.02	136	0,131	0,083	0,011	0,055	<0.02	interfered	0,014	<0.005	0,010	<0.004	0,012	<0.005	0,014	<0.005	<0.03	0,792	<0.01	0,031		1,200	
Ca2/5	<0.05	127	0,297	0,177	<0.02	135	0,135	0,080	0,012	0,053	<0.02	interfered	<0.01	<0.005	0,015	<0.004	0,013	<0.005	0,015	<0.005	<0.03	0,817	<0.01	0,033		0,865	
Ca2/6	<0.05	127	0,296	0,184	<0.02	135	0,137	0,083	0,013	0,054	<0.02	interfered	0,013	<0.005	0,013	<0.004	0,012	<0.005	0,012	<0.005	<0.03	0,817	<0.01	0,030		0,773	
Ca2/7	<0.05	126	0,295	0,183	<0.02	134	0,127	0,076	0,011	0,064	<0.02	interfered	0,011	<0.005	0,015	<0.004	0,016	<0.005	0,012	<0.005	<0.03	0,808	<0.01	0,031		1,214	
Ca2/8	<0.05	128	0,292	0,183	<0.02	134	0,133	0,082	0,013	0,055	<0.02	interfered	<0.01	<0.005	0,015	<0.004	0,014	<0.005	0,014	<0.005	<0.03	0,820	<0.01	0,031		0,835	
Ca2/9	<0.05	128	0,295	0,185	<0.02	135	0,128	0,084	0,013	0,049	<0.02	interfered	0,014	<0.005	0,012	<0.004	0,012	<0.005	0,013	<0.005	<0.03	0,813	<0.01	0,027		0,810	
mean		128	0,298	0,181		135	0,131	0,081	0,012	0,055			0,013		0,014		0,013		0,013			0,812		0,031		0,9	
sd		2	0,005	0,005		1	0,004	0,003	0,001	0,005			0,002		0,002		0,001		0,001			0,009		0,002		0,2	
rsd(%)		1,5	1,7	2,6		0,6	2,9	3,2	7,4	8,8			11,9		15,3		10,5		8,4			1,1		6,4		18	
Hym16/1	<0.4	113	2,75	0,122	<0.04	0,901	1,42	0,290	0,118	0,519	0,087	0,022	0,130	0,021	0,146	0,039	0,127	0,016	0,105	0,016	<0.03	0,536	<0.02	0,110	70,8	0,321	0,651
Hym16/2	<0.4	114	2,83	0,108	<0.04	0,867	1,43	0,285	0,119	0,479	0,071	0,020	0,137	0,016	0,142	0,036	0,119	0,016	0,106	0,015	<0.03	0,543	<0.02	0,106	77,7	0,292	0,743
Hym16/3	<0.4	114	2,76	0,121	<0.04	0,844	1,42	0,295	0,121	0,475	0,075	0,021	0,134	0,019	0,147	0,037	0,120	0,017	0,105	0,016	<0.03	0,537	<0.02	0,104	74,7	0,295	0,712
Hym16/4	<0.4	113	2,76	0,118	<0.04	0,815	1,41	0,277	0,120	0,471	0,072	0,020	0,141	0,020	0,157	0,037	0,125	0,016	0,105	0,016	<0.03	0,537	<0.02	0,108	74,3	0,277	0,709
Hym16/5	<0.4	114	2,81	0,119	<0.04	0,830	1,46	0,292	0,122	0,490	0,085	0,021	0,138	0,017	0,152	0,038	0,132	0,015	0,109	0,016	<0.03	0,540	<0.02	0,111	74,4	0,291	0,687
Hym16/6	<0.4	115	2,85	0,117	<0.04	0,823	1,47	0,280	0,123	0,479	0,082	0,019	0,150	0,023	0,146	0,037	0,123	0,018	0,106	0,016	<0.03	0,542	<0.02	0,109	77,5	0,271	0,573
Hym16/7	<0.4	114	2,77	0,118	<0.04	0,823	1,45	0,282	0,121	0,497	0,082	0,022	0,144	0,019	0,144	0,038	0,132	0,018	0,110	0,018	<0.03	0,545	<0.02	0,110	72,2	0,290	0,707
Hym16/8	<0.4	114	2,80	0,119	<0.04	0,822	1,43	0,300	0,119	0,503	0,078	0,020	0,141	0,018	0,145	0,042	0,117	0,016	0,105	0,013	<0.03	0,536	<0.02	0,113	67,0	0,316	0,673
Hym16/9	<0.4	117	2,87	0,123	<0.04	0,831	1,44	0,295	0,121	0,493	0,088	0,022	0,153	0,019	0,149	0,039	0,134	0,017	0,107	0,017	<0.03	0,554	<0.02	0,108	73,8	0,301	0,683
mean		114	2,80	0,118		0,84	1,44	0,289	0,121	0,49	0,080	0,021	0,141	0,019	0,147	0,038	0,125	0,017	0,106	0,016		0,541		0,109	74	0,29	0,68
sd		1	0,04	0,004		0,03	0,02	0,008	0,002	0,02	0,006	0,001	0,007	0,002	0,004	0,002	0,006	0,001	0,002	0,001		0,006		0,003	3	0,02	0,05
rsd(%)		1,0	1,5	3,5		3,3	1,4	2,7	1,4	3,1	7,9	5,4	5,2	9,7	3,0	4,3	5,0	6,0	1,9	8,2		1,1		2,4	4,5	5,5	7,1

ICP-MS: D: Reproduzierbarkeit der Messung (µg/g) bezogen auf Feststoff

Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U	Y/Ho	Ce/Ce*	Eu/Eu*
MT11/1	<0.2	98,5	0,142	0,683	<0.008	0,743	0,046	0,030	<0.006	0,024	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	0,009	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,016	1,194	<0.004	0,384			
MT11/2	<0.2	97,9	0,144	0,707	<0.008	0,731	0,045	0,028	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	<0.006	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,020	1,195	<0.004	0,371			
MT11/3	<0.2	99,2	0,149	0,703	<0.008	0,740	0,047	0,027	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	0,007	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,016	1,179	<0.004	0,364			
MT11/4	<0.2	98,1	0,152	0,699	<0.008	0,733	0,045	0,025	<0.006	0,024	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	<0.006	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,018	1,198	<0.004	0,376			
MT11/5	<0.2	97,9	0,147	0,668	<0.008	0,688	0,041	0,028	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	0,008	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,016	1,201	<0.004	0,386			
MT11/6	<0.2	101	0,146	0,702	<0.008	0,722	0,045	0,025	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	0,007	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,018	1,211	<0.004	0,372			
MT11/7	<0.2	101	0,148	0,723	<0.008	0,718	0,043	0,027	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	0,010	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,019	1,184	<0.004	0,376			
MT11/8	<0.2	99,59	0,147	0,703	<0.008	0,725	0,046	0,026	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	<0.006	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,015	1,184	<0.004	0,372			
MT11/9	<0.2	101,96	0,154	0,730	<0.008	0,715	0,043	0,027	<0.006	<0.02	<0.02	<0.007	<0.02	<0.005	<0.006	<0.006	<0.009	<0.004	<0.009	<0.005	0,013	1,205	<0.004	0,377			
mean		99	0,148	0,70		0,72	0,044	0,027		0,024					0,008						0,017	1,19		0,375			
sd		2	0,004	0,02		0,02	0,002	0,002		0,000					0,001						0,002	0,01		0,007			
rsd(%)		1,5	2,5	2,7		2,3	4,2	6,1		0,6					17,4						12,6	0,9		1,8			
Pr2/1	<0.1	213	0,463	0,065	<0.009	1,140	0,140	0,135	0,028	0,095	0,029	<0.01	<0.04	<0.006	0,032	0,008	0,033	<0.007	0,028	<0.008	<0.03	0,843	<0.02	0,041	54,8	0,531	
Pr2/2	<0.1	214	0,459	0,051	<0.009	1,171	0,155	0,130	0,021	0,103	0,021	<0.01	<0.04	<0.006	0,029	<0.007	0,026	<0.007	0,026	<0.008	<0.03	0,846	<0.02	0,035		0,900	
Pr2/3	<0.1	206	0,460	0,053	<0.009	1,162	0,141	0,127	0,023	0,105	0,018	<0.01	<0.04	<0.006	0,026	<0.007	0,026	<0.007	0,030	<0.008	<0.03	0,846	<0.02	0,036		0,723	
Pr2/4	<0.1	214	0,474	0,061	<0.009	1,223	0,148	0,127	0,025	0,095	0,021	<0.01	<0.04	<0.006	0,039	0,008	0,027	<0.007	0,024	<0.008	<0.03	0,866	<0.02	0,038	58,5	0,617	
Pr2/5	<0.1	213	0,477	0,067	<0.009	1,196	0,148	0,126	0,025	0,094	0,023	<0.01	<0.04	<0.006	0,028	0,008	0,027	<0.007	0,025	<0.008	<0.03	0,843	<0.02	0,031	62,8	0,606	
Pr2/6	<0.1	211	0,464	0,059	<0.009	1,181	0,150	0,121	0,025	0,102	0,020	<0.01	<0.04	<0.006	0,038	<0.007	0,026	<0.007	0,026	<0.008	<0.03	0,845	<0.02	0,032		0,598	
Pr2/7	<0.1	215	0,484	0,060	<0.009	1,194	0,149	0,125	0,022	0,115	0,019	<0.01	<0.04	<0.006	0,035	0,008	0,033	<0.007	0,022	<0.008	<0.03	0,834	<0.02	0,032	58,4	0,884	
Pr2/8	<0.1	212	0,464	0,072	<0.009	1,160	0,150	0,128	0,025	0,106	0,021	<0.01	<0.04	<0.006	0,028	0,011	0,029	<0.007	0,028	<0.008	<0.03	0,844	<0.02	0,031	44,0	0,645	
Pr2/9	<0.1	213	0,467	0,057	<0.009	1,158	0,156	0,124	0,025	0,097	0,023	<0.01	<0.04	<0.006	0,038	0,010	0,026	<0.007	0,029	<0.008	<0.03	0,851	<0.02	0,035	49,1	0,600	
mean		212	0,47	0,061		1,176	0,149	0,127	0,024	0,10	0,022				0,033	0,009	0,028		0,026			0,846		0,035	55	0,68	
sd		3	0,01	0,007		0,025	0,005	0,004	0,002	0,01	0,003				0,005	0,001	0,003		0,002			0,009		0,003	7	0,13	
rsd(%)		1,2	1,8	11,0		2,1	3,5	3,1	8,6	7,0	15				15	12	11		9,4			1,0		10	13	19,3	
Thy1	<0.2	746	0,077	0,460	<0.01	1,29	0,054	0,037	<0.01	<0.09	<0.06	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	0,367	<0.02	0,081			
Thy2	<0.2	751	0,078	0,467	<0.01	1,42	0,049	0,032	<0.01	<0.09	<0.06	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	0,359	<0.02	0,087			
Thy3	<0.2	729	0,074	0,476	<0.01	1,32	0,046	0,027	<0.01	<0.09	<0.06	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	0,365	<0.02	0,075			
Thy4	<0.2	723	0,078	0,453	<0.01	1,33	0,051	0,034	<0.01	<0.09	<0.06	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	0,360	<0.02	0,081			
Thy5	<0.2	747	0,078	0,462	<0.01	1,36	0,052	0,038	<0.01	<0.09	<0.06	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	0,362	<0.02	0,079			
Thy6	<0.2	748	0,086	0,478	<0.01	1,32	0,047	0,033	<0.01	<0.09	<0.06	<0.02	<0.04	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	0,371	<0.02	0,083			
mean		741	0,079	0,466		1,34	0,050	0,033														0,364		0,081			
sd		12	0,004	0,009		0,04	0,003	0,004														0,005		0,004			
rsd(%)		1,6	5,2	2,0		3,2	6,0	12														1,3		4,8			

10.7 ICP-MS: Messwerte von Standards (Carrara Marmor (GFZ) und Limestone (IAG))

Standard: Carrara Marmor (GFZ)

Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U	Y/Ho	Ce/Ce*	Eu/Eu*
Car-01	<0.1	132	3,38	0,06	<0.007	1,85	2,408	0,995	0,371	1,482	0,274	0,065	0,341	0,048	0,332	0,075	0,226	0,030	0,172	0,025	<0.01	1,11	0,024	<0.005	45,0	0,33	0,69
Car-02	<0.09	127	3,34	0,59	<0.007	2,14	2,349	0,978	0,351	1,515	0,284	0,071	0,358	0,048	0,335	0,065	0,207	0,025	0,174	0,025	<0.02	1,04	0,021	0,010	51,5	0,36	0,74
Car-03	<0.1	130	3,51	0,12	<0.02	1,91	2,341	0,989	0,343	1,457	0,288	0,064	0,344	0,043	0,322	0,070	0,202	0,026	0,173	0,026	<0.07	4,48	0,019	<0.01	49,9	0,37	0,67
Car-04	<0.05	129	3,40	0,13	<0.02	2,39	2,306	0,942	0,353	1,451	0,267	0,063	0,358	0,048	0,318	0,071	0,215	0,026	0,180	0,023	<0.03	1,91	0,023	<0.008	47,8	0,33	0,68
Carr-05	<0.4	135	3,51	0,91	<0.03	1,74	2,257	0,924	0,338	1,376	0,249	0,062	0,330	0,046	0,308	0,067	0,203	0,028	0,172	0,025	<0.03	2,42	0,025	<0.02	52,2	0,34	0,71
Mean		131	3,43	0,4		2,0	2,33	0,97	0,35	1,46	0,27	0,065	0,35	0,047	0,32	0,070	0,21	0,027	0,174	0,025		2	0,022		49	0,34	0,70
SD		3	0,08	0,4		0,3	0,06	0,03	0,01	0,05	0,02	0,004	0,01	0,002	0,01	0,004	0,01	0,002	0,004	0,001		1	0,002		3	0,02	0,03
RSD(%)		2,2	2,3	103		12,9	2,4	3,2	3,5	3,5	5,7	5,6	3,5	4,7	3,4	5,6	4,6	7,3	2,0	4,2		64,0	11,1		5,9	5,0	3,7

Standard: Limestone(IAG)

Probe	Rb	Sr	Y	Zr	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U	Y/Ho	Ce/Ce*	Eu/Eu*
Cal-S-01	<0.1	216	1,72	0,12	<0.007	1,22	0,794	0,289	0,081	0,345	0,064	0,016	0,094	0,012	0,105	0,024	0,082	<0.01	0,067	0,008	<0.01	0,55	0,022	0,801	71,0	0,45	0,72
Cal-S-02	<0.09	212	1,68	0,11	<0.007	1,14	0,800	0,298	0,082	0,343	0,065	0,016	0,075	0,011	0,098	0,023	0,081	<0.01	0,067	0,011	<0.02	0,70	0,019	0,786	72,1	0,46	0,70
Cal-S-03	<0.1	208	1,68	0,14	<0.02	1,12	0,794	0,288	0,080	0,344	<0.1	<0.02	0,086	<0.01	0,089	0,022	0,075	<0.01	0,065	<0.01	<0.07	0,90	0,022	0,795	77,3	0,46	
Cal-S-04	<0.05	223	1,74	0,48	<0.02	1,17	0,780	0,290	0,081	0,332	0,056	0,013	0,087	0,010	0,099	0,023	0,078	<0.01	0,062	0,009	<0.03	0,93	0,018	0,837	76,4	0,44	0,68
Cal-S-05	<0.4	231	1,80	0,25	<0.03	1,23	0,78	0,294	0,079	0,340	0,052	<0.02	0,081	<0.02	0,094	0,023	0,081	<0.02	0,067	<0.01	<0.03	3,83	0,023	0,822	77,5	0,47	
Mean		218	1,72	0,2		1,18	0,790	0,292	0,081	0,341	0,059	0,015	0,085	0,011	0,097	0,0230	0,079		0,065	0,010		1	0,021	0,808	75	0,46	0,70
SD		9	0,05	0,2		0,05	0,009	0,004	0,001	0,005	0,006	0,002	0,007	0,001	0,006	0,0009	0,003		0,002	0,001		1	0,002	0,021	3	0,01	0,02
RSD(%)		4,2	2,8	70,2		4,1	1,1	1,5	1,2	1,5	10,7	10,9	8,3	9,9	6,1	3,9	4,0		3,4	14,8		99,9	10,6	2,6	4,1	2,5	2,6
Reference		233	2,2		0,13		0,89	0,4	0,1	0,391	0,071	0,02	0,101	0,017	0,1105	0,0286	0,08772	0,012	0,07489	0,0107				0,8162	76,9	0,48	0,75

10.8 ICP-MS: Driftkontrolle von Proben und GSJ Dolomit-Standard bei Verdünnungsfaktor 1000 und 5000

Driftkontrolle	Messung 16.05.01, Verdünnungsfaktor 1000							Messung 17.05.01, Verdünnungsfaktor 1000							Messung 18.05.01, Verdünnungsfaktor 1000							
	Element	33/4	33/5	33/6	33/7	Mean	sd	rsd	64/4	64/5	64/6	64/7	Mean	sd	rsd	Nr-15/4	Nr-15/5	Nr-15/6	Nr-15/7	Mean	sd	rsd
Rb	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.02			<0.03	<0.03	<0.03	0,03	<0.03			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			
Sr	231	231	233	238	233	3	1,4	123	122	123	126	123	2	1,5	73,8	77,0	78,3	80,1	78	2	2,0	
Y	2,21	2,25	2,24	2,27	2,24	0,03	1,1	2,64	2,64	2,61	2,63	2,63	0,02	0,6	0,111	0,116	0,118	0,114	0,116	0,002	1,8	
Zr	0,22	0,22	0,22	0,22	0,220	0,004	1,6	0,10	0,10	0,10	0,10	0,099	0,004	3,7	0,25	0,26	0,27	0,28	0,27	0,01	3,7	
Cs	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,001	16,0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,0019	0,0002	11,6	<0.001	<0.001	<0.001	0,001	<0.001			
Ba	1,30	1,30	1,29	1,35	1,31	0,03	2,0	0,40	0,40	0,40	0,43	0,41	0,01	2,9	1,14	1,15	1,10	1,11	1,12	0,03	2,3	
La	0,553	0,568	0,564	0,576	0,565	0,009	1,7	1,22	1,22	1,21	1,20	1,214	0,007	0,6	0,036	0,037	0,038	0,037	0,0372	0,0006	1,5	
Ce	0,303	0,305	0,305	0,315	0,307	0,005	1,7	1,09	1,06	1,07	1,08	1,08	0,01	1,1	0,033	0,031	0,031	0,032	0,0315	0,0004	1,4	
Pr	0,098	0,101	0,102	0,105	0,102	0,003	3,1	0,231	0,229	0,229	0,232	0,231	0,002	0,7	0,005	0,005	0,005	0,005	0,0052	0,0000	0,5	
Nd	0,441	0,448	0,446	0,447	0,445	0,003	0,7	0,951	0,949	0,964	0,960	0,956	0,007	0,7	0,022	0,023	0,021	0,024	0,0228	0,0016	6,9	
Sm	0,093	0,093	0,093	0,099	0,095	0,003	3,0	0,200	0,195	0,189	0,201	0,196	0,005	2,8	0,003	0,003	0,004	0,004	0,0036	0,0008	22,0	
Eu	0,024	0,024	0,024	0,026	0,0246	0,0007	2,7	0,045	0,045	0,045	0,047	0,046	0,001	2,1	0,001	0,001	0,001	0,002	0,0012	0,0004	33,5	
Gd	0,133	0,140	0,129	0,141	0,136	0,006	4,3	0,236	0,224	0,245	0,247	0,24	0,01	4,3	0,006	0,006	0,006	0,003	0,0051	0,0015	30,4	
Tb	0,021	0,021	0,021	0,022	0,0215	0,0005	2,4	0,035	0,036	0,034	0,037	0,035	0,001	3,5	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0009	0,0002	20,3	
Dy	0,151	0,163	0,157	0,163	0,158	0,005	3,4	0,225	0,229	0,229	0,228	0,228	0,002	0,9	0,006	0,006	0,007	0,006	0,0061	0,0006	10,0	
Ho	0,038	0,039	0,041	0,042	0,040	0,002	4,8	0,050	0,050	0,050	0,050	0,0501	0,0004	0,8	0,002	0,002	0,002	0,001	0,0016	0,0001	7,1	
Er	0,127	0,124	0,127	0,129	0,127	0,002	1,8	0,150	0,145	0,151	0,149	0,149	0,003	1,7	0,005	0,006	0,005	0,005	0,0053	0,0005	9,2	
Tm	0,018	0,018	0,018	0,018	0,0177	0,0002	0,9	0,017	0,019	0,019	0,020	0,019	0,001	6,0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0007	0,0001	13,2	
Yb	0,107	0,113	0,109	0,112	0,110	0,003	2,3	0,113	0,118	0,117	0,116	0,116	0,003	2,2	0,005	0,006	0,004	0,005	0,0051	0,0011	20,7	
Lu	0,016	0,016	0,016	0,017	0,0166	0,0004	2,4	0,017	0,017	0,017	0,018	0,0172	0,0004	2,3	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0010	0,0001	9,1	
Hf	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01			
Pb	0,77	0,78	0,79	0,81	0,79	0,02	2,1	0,62	0,61	0,61	0,61	0,612	0,004	0,6	2,28	2,28	2,24	2,26	2,26	0,02	1,0	
Th	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01			<0.005	0,030	0,031	0,026	0,029	0,002	8,1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01			
U	0,023	0,022	0,022	0,022	0,0221	0,0005	2,3	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016	0,001	3,5	0,034	0,035	0,034	0,034	0,035	0,001	1,7	
Y/Ho	58,2	57,6	54,5	53,7	56	2	3,9	52,4	53,2	51,7	52,7	52,5	0,6	1,2	70,4	71,4	72,7	79,5	75	4	5,8	

Driftkontrolle	Messung 09.04.01, Verdünnungsfaktor 5000							Messung 10.04.01, Verdünnungsfaktor 5000							11.04.01, Verdünnungsfaktor 5000								
	Element	30/4	30/5	30/6	30/7	Mean	sd	rsd	30/4	30/5	30/6	30/7	Mean	sd	rsd	30/4	30/5	30/6	30/7	30/8	Mean	sd	rsd
Rb	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			
Sr	194	195	198	197	196	2	1,1	192	198	197	199	197	3	1,5	195	195	199	199	199	198	2	1,1	
Y	1,89	1,86	1,89	1,90	1,88	0,02	1,0	1,91	1,88	1,88	1,92	1,90	0,02	1,0	1,89	1,89	1,87	1,89	1,88	1,88	0,01	0,6	
Zr	0,22	0,26	0,25	0,25	0,24	0,02	6,4	0,22	0,23	0,23	0,24	0,230	0,007	2,9	0,25	0,24	0,26	0,27	0,27	0,26	0,01	4,7	
Cs	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002			<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005			<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003			
Ba	1,14	1,16	1,15	1,24	1,17	0,05	3,9	1,24	1,23	1,19	1,23	1,22	0,02	1,8	1,05	1,16	1,09	1,12	1,12	1,11	0,04	3,7	

Driftkontrolle	Messung 09.04.01, Verdünnungsfaktor 5000							Messung 10.04.01, Verdünnungsfaktor 5000							11.04.01, Verdünnungsfaktor 5000							
	Element	30/4	30/5	30/6	30/7	Mean	sd	rsd	30/4	30/5	30/6	30/7	Mean	sd	rsd	30/4	30/5	30/6	30/7	30/8	Mean	sd
La	0,518	0,517	0,522	0,517	0,518	0,002	0,4	0,507	0,510	0,507	0,511	0,509	0,002	0,4	0,507	0,494	0,509	0,520	0,503	0,51	0,01	1,9
Ce	0,289	0,297	0,302	0,303	0,298	0,007	2,2	0,290	0,303	0,308	0,315	0,30	0,01	3,5	0,294	0,303	0,298	0,304	0,295	0,299	0,004	1,5
Pr	0,092	0,083	0,082	0,086	0,086	0,005	5,4	0,092	0,084	0,084	0,089	0,087	0,004	4,8	0,085	0,083	0,083	0,085	0,086	0,084	0,001	1,7
Nd	0,390	0,370	0,366	0,371	0,37	0,01	2,8	0,372	0,376	0,375	0,358	0,370	0,008	2,3	0,401	0,364	0,390	0,354	0,374	0,38	0,02	5,0
Sm	0,085	0,086	0,076	0,078	0,081	0,005	5,9	0,072	0,083	0,073	0,069	0,074	0,006	8,2	0,069	0,071	0,076	0,075	0,088	0,076	0,008	9,9
Eu	0,018	0,018	0,022	0,021	0,020	0,002	10,4	0,018	0,016	0,012	0,017	0,016	0,003	16,4	0,019	0,018	0,017	0,019	0,017	0,0179	0,0008	4,5
Gd	0,100	0,098	0,102	0,130	0,11	0,02	14,1	0,117	0,111	0,107	0,113	0,112	0,004	3,7	0,111	0,095	0,107	0,115	0,090	0,10	0,01	10,2
Tb	0,016	0,018	0,018	0,017	0,0173	0,0006	3,5	0,017	0,013	0,015	0,016	0,015	0,002	10,7	0,020	0,017	0,015	0,018	0,013	0,017	0,003	16,9
Dy	0,133	0,115	0,136	0,135	0,13	0,01	7,5	0,123	0,125	0,118	0,118	0,121	0,004	3,0	0,123	0,123	0,116	0,121	0,116	0,119	0,004	3,0
Ho	0,028	0,031	0,028	0,032	0,030	0,002	6,7	0,028	0,028	0,027	0,029	0,028	0,001	3,7	0,029	0,029	0,031	0,028	0,028	0,029	0,001	3,8
Er	0,098	0,097	0,099	0,102	0,099	0,002	2,2	0,098	0,088	0,100	0,096	0,095	0,005	5,4	0,108	0,100	0,098	0,098	0,090	0,099	0,006	6,4
Tm	0,014	0,011	0,012	0,017	0,014	0,003	18,5	0,013	0,013	0,011	0,010	0,012	0,001	11,5	0,009	0,011	0,012	0,012	0,014	0,012	0,002	14,4
Yb	0,076	0,082	0,080	0,083	0,080	0,003	3,8	0,075	0,072	0,082	0,078	0,077	0,004	5,8	0,074	0,080	0,074	0,076	0,088	0,078	0,006	7,4
Lu	0,011	0,011	0,009	0,012	0,011	0,001	11,7	0,010	0,009	0,010	0,009	0,0097	0,0007	7,0	0,012	0,009	0,011	0,010	0,013	0,011	0,001	13,2
Hf	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03			<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03			<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,03		
Pb	0,69	0,67	0,67	0,68	0,68	0,01	1,5	0,63	0,65	0,65	0,64	0,644	0,008	1,3	0,63	0,60	0,62	0,64	0,60	0,62	0,02	2,7
Th	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04			<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04		
U	0,010	0,012	0,015	0,011	0,012	0,002	15,8	0,011	0,017	0,015	0,012	0,014	0,003	19,9	0,016	0,015	0,012	0,015	0,014	0,014	0,001	10,1
Y/Ho	67,1	59,4	66,6	59,1	63	4	7,0	67,2	66,9	70,9	66,2	68	2	3,1	66,2	65,2	61,0	68,2	66,6	65	3	4,2

	Messung 25.05.01, Verdünnungsfaktor 1000							Messung 22.05.01, Verdünnungsfaktor 1000							Messung 23.05.01, Verdünnungsfaktor 1000						
	10/4	10/5	10/6	10/7	Mean	sd	rsd	SILFA-P1/4	SILFA-P1/5	SILFA-P1/6	SILFA-P1/7	Mean	sd	rsd	HAM-2P1/4	HAM-2P1/5	HAM-2P1/6	HAM-2P1/7	Mean	sd	rsd
Rb	0,22	0,22	0,22	0,23	0,223	0,005	2,2	97,0	96,7	93,9	101	97,2	3	3,1	0,058	0,060	0,061	0,058	0,059	0,002	2,7
Sr	13,6	13,2	12,7	12,9	13,1	0,4	2,9	44,9	44,1	42,5	44,6	44,0	1,0	2,4	166	166	174	190	174	11	6,3
Y	1,14	1,12	1,11	1,12	1,12	0,01	1,2	2,28	2,29	2,21	2,34	2,28	0,05	2,3	6,19	6,19	6,19	6,28	6,21	0,04	0,7
Zr	0,21	0,21	0,22	0,22	0,216	0,004	1,9	0,73	0,71	0,72	0,75	0,73	0,02	2,2	0,133	0,125	0,129	0,129	0,129	0,003	2,6
Cs	0,027	0,026	0,028	0,027	0,0272	0,0009	3,4	12,9	12,8	12,7	12,5	12,7	0,15	1,2	0,0158	0,0139	0,0141	0,0143	0,0145	0,0008	5,8
Ba	2,86	2,88	2,80	2,85	2,85	0,04	1,3	156	156	154	151	154	2	1,4	1,04	1,01	1,04	1,01	1,03	0,02	1,9
La	1,850	1,795	1,825	1,789	1,81	0,03	1,6	0,425	0,426	0,424	0,414	0,422	0,01	1,3	2,10	2,07	2,10	2,11	2,09	0,02	0,8
Ce	0,428	0,423	0,425	0,423	0,425	0,003	0,6	1,06	1,06	1,06	1,05	1,06	0,00	0,4	1,20	1,18	1,22	1,21	1,20	0,02	1,3
Pr	0,340	0,339	0,333	0,327	0,335	0,006	1,8	0,173	0,178	0,177	0,170	0,175	0,004	2,1	0,390	0,382	0,387	0,391	0,387	0,004	1,0
Nd	1,261	1,220	1,230	1,222	1,23	0,02	1,5	0,927	0,923	0,949	0,914	0,928	0,01	1,6	1,64	1,64	1,63	1,63	1,634	0,007	0,4
Sm	0,187	0,183	0,184	0,178	0,183	0,004	2,2	0,304	0,307	0,311	0,306	0,307	0,003	0,9	0,341	0,341	0,353	0,354	0,347	0,007	2,1
Eu	0,040	0,038	0,039	0,039	0,0390	0,0007	1,7	0,092	0,098	0,097	0,091	0,094	0,0035	3,7	0,085	0,087	0,086	0,084	0,086	0,001	1,5
Gd	0,165	0,165	0,173	0,169	0,168	0,004	2,2	0,394	0,399	0,388	0,373	0,389	0,01	2,9	0,467	0,467	0,469	0,472	0,469	0,002	0,5
Tb	0,022	0,021	0,020	0,020	0,0208	0,0007	3,3	0,062	0,061	0,065	0,063	0,062	0,002	2,6	0,075	0,071	0,073	0,073	0,073	0,001	1,9
Dy	0,120	0,120	0,115	0,112	0,117	0,004	3,2	0,411	0,401	0,406	0,397	0,404	0,006	1,5	0,502	0,501	0,506	0,499	0,502	0,003	0,6
Ho	0,023	0,022	0,024	0,024	0,0234	0,0009	3,8	0,086	0,088	0,084	0,084	0,085	0,002	2,2	0,117	0,115	0,115	0,113	0,115	0,002	1,4
Er	0,069	0,062	0,065	0,067	0,066	0,003	5,0	0,259	0,260	0,257	0,260	0,259	0,001	0,5	0,348	0,345	0,353	0,352	0,350	0,004	1,1
Tm	0,008	0,008	0,008	0,008	0,0082	0,0002	2,0	0,040	0,037	0,036	0,038	0,038	0,002	4,3	0,044	0,043	0,043	0,043	0,0431	0,0006	1,4
Yb	0,050	0,048	0,050	0,049	0,0493	0,0009	1,8	0,261	0,262	0,269	0,265	0,264	0,004	1,4	0,263	0,264	0,263	0,259	0,262	0,002	0,8
Lu	0,007	0,008	0,008	0,008	0,0076	0,0007	9,7	0,044	0,044	0,042	0,044	0,043	0,001	1,7	0,034	0,034	0,035	0,034	0,0343	0,0004	1,2
Hf	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01			0,03	0,03	0,03	0,03	<0,01			<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005		
Pb	0,51	0,51	0,52	0,51	0,512	0,005	0,9	7,71	7,80	7,82	7,78	7,78	0,05	0,6	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	0,00	0,2

		Messung 25.05.01, Verdünnungsfaktor 1000							Messung 22.05.01, Verdünnungsfaktor 1000							Messung 23.05.01, Verdünnungsfaktor 1000						
		10/4	10/5	10/6	10/7	Mean	sd	rsd	SILFA-P1/4	SILFA-P1/5	SILFA-P1/6	SILFA-P1/7	Mean	sd	rsd	HAM-2P1/4	HAM-2P1/5	HAM-2P1/6	HAM-2P1/7	Mean	sd	rsd
Th		0,1	0,1	0,1	0,1	0,056	0,003	5,0	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,00	5,0	<0.008	<0.008	<0.008	<0.008	<0.008		
U		0,037	0,037	0,034	0,038	0,036	0,002	4,3	0,034	0,035	0,035	0,036	0,035	0,001	2,8	0,021	0,022	0,023	0,024	0,022	0,001	5,3
Y/Ho		48,5	50,5	46,4	46,5	48	2	4,0	26,5	26,1	26,5	27,9	26,7	1	2,9	53,0	53,8	53,7	55,6	54	1	2,0

(Verdünnungsfaktor 1000)		GSJ Dolomit-Standard JDo-1									GSJ Dolomit-Standard JDo-1										
Element	JDo-1A/1	JDo-1A/2	JDo-1A/3	JDo-1A/4	JDo-1A/5	JDo-1A/6	MeanA	sd	rsd(%)	JDo-1B/1	JDo-1B/2	JDo-1B/3	JDo-1B/4	JDo-1B/5	JDo-1B/6	MeanB	sd	rsd(%)	Imai	Dulski	
Rb	<0.03	<0.03	<0.02	0,03	0,03	<0.02	<0.03			<0.03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,0	<0.03			1,75	0,14	
Sr	115	117	114	112	114	124	116	4	3,6	118	116	111	112	111	124	115	5	4,6	116	117	
Y	9,73	9,68	9,83	9,92	10,1	9,72	9,8	0,2	1,7	9,89	9,57	9,41	9,92	9,88	9,64	9,7	0,2	2,2	10,3	10,4	
Zr	0,50	0,29	0,30	0,65	0,55	0,57	0,5	0,1	31,3	0,40	0,28	0,20	1,32	0,47	0,35	0,5	0,4	82	6,21	0,56	
Cs	0,004	0,002	0,002	0,003	0,002	0,004	0,0029	0,0009	30,4	0,186	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,03	0,07	221	0,070	<0.006	
Ba	6,30	6,47	6,11	6,28	7,42	6,09	6,4	0,5	7,8	6,60	6,56	6,42	6,32	6,08	6,79	6,5	0,2	3,8	6,14	7	
La	7,37	7,42	7,40	7,32	7,40	7,36	7,38	0,04	0,5	7,59	7,37	7,26	7,41	7,34	7,41	7,4	0,1	1,5	7,93	7,7	
Ce	1,94	1,98	1,96	1,92	1,95	1,96	1,95	0,02	1,0	2,02	1,96	1,91	1,93	1,94	1,95	1,95	0,03	1,8	2,49	2,02	
Pr	0,967	0,991	0,966	0,962	0,986	0,969	0,97	0,01	1,3	0,997	0,970	0,946	0,964	0,969	0,979	0,97	0,02	1,7	0,956	1,05	
Nd	4,02	4,10	4,01	3,95	4,04	3,95	4,01	0,06	1,4	4,13	4,05	3,93	4,01	3,99	3,95	4,01	0,07	1,8	5,25	4,09	
Sm	0,688	0,685	0,674	0,675	0,677	0,682	0,680	0,006	0,8	0,690	0,674	0,652	0,672	0,677	0,680	0,67	0,01	1,9	0,788	0,68	
Eu	0,155	0,156	0,159	0,156	0,158	0,152	0,156	0,002	1,5	0,161	0,153	0,153	0,154	0,161	0,154	0,156	0,004	2,4	0,176	0,162	
Gd	0,894	0,897	0,879	0,839	0,881	0,838	0,87	0,03	3,0	0,887	0,856	0,866	0,866	0,898	0,883	0,88	0,02	1,8	1,3	0,90	
Tb	0,116	0,115	0,118	0,117	0,117	0,115	0,116	0,001	1,1	0,122	0,114	0,114	0,119	0,119	0,116	0,117	0,003	2,9	0,116	0,120	
Dy	0,749	0,738	0,732	0,731	0,735	0,734	0,737	0,006	0,9	0,754	0,729	0,719	0,739	0,735	0,733	0,73	0,01	1,6	0,814	0,75	
Ho	0,164	0,156	0,160	0,158	0,160	0,159	0,160	0,003	1,6	0,165	0,161	0,155	0,159	0,160	0,158	0,160	0,003	2,2	0,42	0,167	
Er	0,462	0,451	0,452	0,450	0,453	0,447	0,453	0,005	1,1	0,470	0,445	0,448	0,457	0,461	0,450	0,455	0,009	2,1		0,46	
Tm	0,052	0,054	0,054	0,054	0,052	0,052	0,053	0,001	2,0	0,053	0,054	0,052	0,055	0,054	0,050	0,053	0,002	3,1	0,059	0,056	
Yb	0,298	0,291	0,293	0,295	0,302	0,289	0,295	0,005	1,6	0,310	0,291	0,294	0,305	0,296	0,290	0,298	0,008	2,6	0,323	0,305	
Lu	0,042	0,040	0,041	0,040	0,041	0,040	0,0407	0,0009	2,3	0,042	0,042	0,039	0,043	0,042	0,041	0,041	0,002	3,7	0,0494	0,043	
Hf	<0.02	<0.01	<0.01	0,02	<0.02	0,01	<0.02			<0.02	<0.01	<0.01	0,03	<0.02	<0.005	<0.02			0,0897	<0.03	
Pb	1,58	0,60	0,66	0,73	1,27	2,07	1,2	0,6	51,3	2,02	0,82	0,70	1,09	1,00	0,88	1,1	0,5	44,1	0,95	0,77	
Th	0,03	0,03	0,03	0,03	<0.02	0,02	<0.03			0,03	0,03	0,03	0,03	<0.02	0,02	<0.03			0,0429	<0.04	
U	0,804	0,792	0,783	0,782	0,796	0,760	0,79	0,02	1,9	0,821	0,782	0,762	0,784	0,796	0,774	0,79	0,02	2,6	0,858	0,88	
Y/Ho	59,4	61,9	61,5	62,8	63,1	60,9	62	1	2,2	59,9	59,3	60,8	62,4	61,9	61,0	61	1	1,9	25	62	
Ca(Gew%)	23,5	24,5	24,5	24,3	24,4	24,1	24,2	0,4	1,6	24,0	24,3	24,0	24,2	24,4	24,3	24,2	0,2	0,7	24,4		

(Verdünnungsfaktor 5000)		GSJ Dolomit-Standard JDo-1									GSJ Dolomit-Standard JDo-1								
Element	JDo-1A/1	JDo-1A/2	JDo-1A/3	JDo-1A/4	JDo-1A/5	JDo-1A/6	JDo-1A	sd	rsd(%)	JDo-1B/1	JDo-1B/2	JDo-1B/3	JDo-1B/4	JDo-1B/5	JDo-1B/6	JDo-1B	sd	rsd(%)	

(Verdünnungsfaktor 5000)		GSJ Dolomit-Standard JDo-1								GSJ Dolomit-Standard JDo-1								
Element	JDo-1A/1	JDo-1A/2	JDo-1A/3	JDo-1A/4	JDo-1A/5	JDo-1A/6	JDo-1A	sd	rsd(%)	JDo-1B/1	JDo-1B/2	JDo-1B/3	JDo-1B/4	JDo-1B/5	JDo-1B/6	JDo-1B	sd	rsd(%)
Rb	<0.02	<0.03	<0.03	<0.02	<0.02	<0.02	<0.03			<0.02	<0.03	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.03		
Sr	109	112	114	116	114	110	112	3	2,4	111	113	111	114	114	112	113	1	1,0
Y	9,49	9,86	9,96	9,90	9,93	9,72	9,8	0,2	1,8	9,74	9,93	9,83	9,87	9,77	9,97	9,85	0,09	0,9
Zr	0,40	0,20	0,22	0,56	0,40	0,43	0,4	0,1	36,9	0,32	0,18	0,12	1,21	0,31	0,23	0,4	0,4	103
Cs	0,003	<0.005	<0.005	0,003	<0.004	<0.004	0,0035			0,161	<0.005	<0.003	<0.003	<0.004	<0.004	0,161		
Ba	5,95	6,31	6,15	6,07	7,23	5,90	6,3	0,5	7,9	6,40	6,11	6,02	6,08	6,06	6,17	6,14	0,14	2,2
La	7,16	7,31	7,39	7,42	7,34	7,26	7,3	0,1	1,3	7,25	7,33	7,20	7,51	7,35	7,42	7,3	0,1	1,5
Ce	1,85	1,91	1,89	1,94	1,97	1,87	1,91	0,05	2,4	1,93	1,91	1,90	1,96	1,91	1,90	1,92	0,02	1,3
Pr	0,930	0,955	0,968	0,975	0,969	0,942	0,96	0,02	1,8	0,953	0,956	0,965	0,976	0,965	0,958	0,96	0,01	0,9
Nd	3,86	3,88	3,92	3,96	3,90	3,81	3,89	0,05	1,4	3,91	3,91	3,86	3,93	3,99	3,84	3,91	0,05	1,3
Sm	0,656	0,652	0,652	0,654	0,666	0,677	0,659	0,010	1,5	0,649	0,633	0,626	0,636	0,652	0,646	0,64	0,01	1,6
Eu	0,157	0,147	0,154	0,157	0,154	0,155	0,154	0,004	2,4	0,153	0,137	0,149	0,151	0,146	0,159	0,149	0,007	4,8
Gd	0,856	0,863	0,884	0,848	0,884	0,861	0,87	0,01	1,7	0,848	0,900	0,863	0,912	0,811	0,848	0,86	0,04	4,3
Tb	0,104	0,110	0,116	0,114	0,112	0,111	0,111	0,004	3,6	0,110	0,108	0,114	0,117	0,118	0,113	0,113	0,004	3,6
Dy	0,710	0,756	0,695	0,722	0,728	0,712	0,720	0,021	2,9	0,692	0,715	0,697	0,730	0,714	0,681	0,70	0,02	2,6
Ho	0,156	0,160	0,158	0,159	0,159	0,163	0,159	0,002	1,4	0,155	0,156	0,150	0,156	0,155	0,152	0,154	0,002	1,5
Er	0,415	0,434	0,436	0,435	0,446	0,426	0,432	0,010	2,4	0,446	0,429	0,445	0,446	0,448	0,448	0,444	0,007	1,7
Tm	0,053	0,050	0,051	0,051	0,053	0,055	0,052	0,002	3,6	0,057	0,053	0,052	0,057	0,051	0,048	0,053	0,004	6,9
Yb	0,281	0,278	0,269	0,279	0,283	0,284	0,279	0,005	1,9	0,279	0,288	0,280	0,298	0,288	0,282	0,286	0,007	2,6
Lu	0,041	0,039	0,037	0,044	0,038	0,037	0,039	0,003	7,3	0,043	0,035	0,042	0,036	0,037	0,041	0,039	0,003	8,5
Hf	<0.03	<0.03	<0.03	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04			<0.03	<0.03	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04		
Pb	1,57	0,58	0,67	0,67	1,32	2,02	1,1	0,6	51,9	1,98	0,74	0,69	1,07	1,17	0,81	1,1	0,5	44,6
Th	<0.05	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.05			<0.05	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.05		
U	0,754	0,784	0,810	0,792	0,779	0,782	0,78	0,02	2,3	0,803	0,741	0,753	0,766	0,757	0,774	0,77	0,02	2,8
Y/Ho	60,7	61,5	63,1	62,1	62,3	59,5	61,5	1,3	2,1	62,9	63,8	65,6	63,5	63,2	65,5	64,1	1,2	1,8
Ca(Gew%)	23,5	24,5	24,5	24,3	24,4	24,1	24,2	0,4	1,6	24,0	24,3	24,0	24,2	24,4	24,3	24,2	0,2	0,7

10.9 ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000 xl: Blindwerte-, Standard- tw. Probenmessung

ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000 xl: Blindwerte-, -Standard-, Probenmessung															
	Ca	Ba	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Sr	Zn	CaCO ₃	MgCO ₃	ΣCO ₃	CaO	MgO
	Gew%	ppm	ppm	ppm	Gew%	ppm	Gew%	Gew%	ppm	ppm	Gew%	Gew%	Gew%	Gew%	Gew%
BW-1	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-2	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-3	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-4	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-5	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-6	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-7	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	4,09					
BW-8	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	2,55					
BW-9	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-10	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-11	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-12	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-13	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-14	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
BW-15	<0,0025	<1,25	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5					
M-1(CaCO ₃)	39,0	3,50	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	97,3	<0,017	97,3	54,5	
M-2	39,0	3,52	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	97,5	<0,017	97,5	54,6	
M-3	39,2	3,65	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	98,0	<0,017	98,0	54,9	
M-4	39,2	3,58	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	98,0	<0,017	98,0	54,9	
M-5	38,5	3,55	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	96,2	<0,017	96,2	53,9	
M-6	39,3	3,58	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	98,3	<0,017	98,3	55,1	
M-7	39,2	3,43	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	98,0	<0,017	98,0		
M-8	40,9	3,57	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	102,3	<0,017	102,3		
M-9	40,2	3,56	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	100,4	<0,017	100,4		
M-10	40,6	3,65	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	101,3	<0,017	101,3		
M-11	40,6	3,66	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	101,4	<0,017	101,4		
M-12	40,5	3,68	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	101,2	<0,017	101,2		
M-13	40,3	3,67	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	100,6	<0,017	100,6		
M-14	40,5	3,69	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	101,2	<0,017	101,2		
M-15	40,4	3,67	<2,5	<75	<0,005	<2,5	<0,0075	<0,0075	<2,5	<2,5	100,9	<0,017	100,9		
Cal-S-01(Std.)	40,1	<1,25	181	<75	0,20	9,08	0,0088	<0,0075	253	10,76	100,2	0,69	100,9	56,2	0,33
Cal-S-02	39,4	<1,25	140	<75	0,20	9,12	0,0088	<0,0075	249	9,33	98,3	0,69	99,0	55,1	0,33
Cal-S-03	39,5	<1,25	153	<75	0,20	9,32	0,0091	<0,0075	249	9,84	98,7	0,70	99,4	55,3	0,33
Cal-S-04	40,2	<1,25	137,8	<75	0,21	9,19	0,0084	<0,0075	235	10,4	100,5	0,73	101,2		
Cal-S-05	39,9	1,25	169,9	<75	0,21	9,25	0,0082	<0,0075	238	10,9	99,7	0,73	100,4		
Cal-S-06	39,8	1,28	164,7	<75	0,21	9,26	0,0083	<0,0075	239	10,6	99,4	0,74	100,2		
Cal-S-07	39,7	1,26	168,5	<75	0,21	9,25	0,0082	<0,0075	239	11,0	99,1	0,73	99,8		
Carr-1(Std.)	39,0	1,76	176	<75	0,41	37,2	<0,0075	#####	151	3,18	97,3	1,42	98,7	54,5	0,68
Carr-2	38,2	2,10	172	<75	0,40	37,1	<0,0075	#####	146	5,07	95,4	1,40	96,8	53,4	0,67
Carr-3	38,2	1,79	191	<75	0,41	38,0	<0,0075	#####	146	3,01	95,5	1,44	96,9	53,5	0,69
Carr-4	38,7	2,14	164,1	<75	0,42	35,92	<0,0075	0,017	134	5,36	96,6	1,47	98,1		
Carr-5	38,4	1,85	181,5	<75	0,42	36,31	<0,0075	0,014	135	4,09	95,8	1,47	97,2		
Carr-6	38,4	2,07	169,8	<75	0,43	36,97	<0,0075	0,015	137	3,38	95,8	1,48	97,3		
Carr-7	38,0	1,90	162,4	<75	0,42	36,46	<0,0075	0,013	137	2,70	94,9	1,47	96,4		

ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000 xl: Blindwerte, -Standard-, Probenmessung															
	Ca	Ba	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Sr	Zn	CaCO ₃	MgCO ₃	ΣCO ₃	CaO	MgO
Carr-8	38,6	1,93	164,4	<75	0,42	36,24	<0,0075	0,016	137	8,46	96,3	1,47	97,8		
Museums und Lagerstättenproben (exemplarisch)															
29	38,9	2,18	21,4	<75	0,33	6,73	<0,0075	#####	226	9,35	97,0	1,16	98,2	54,4	0,55
42	39,1	1,32	19,9	<75	0,31	7,45	<0,0075	#####	252	4,26	97,6	1,08	98,7	54,7	0,52
43	38,5	1,42	26,8	<75	0,36	8,51	<0,0075	#####	266	4,67	96,1	1,24	97,4	53,9	0,59
54	38,6	<1,25	28,4	<75	0,31	10,4	<0,0075	<0,0075	210	8,16	96,4	1,09	97,4	54,0	0,52
58(GF)	38,8	1,29	40,1	<75	0,33	7,75	<0,0075	<0,0075	237	4,68	96,8	1,14	97,9	54,2	0,54
59	38,9	<1,25	17,4	<75	0,30	8,03	<0,0075	<0,0075	139	4,05	97,1	1,04	98,2	54,4	0,50
60	36,0	<1,25	162	<75	2,22	19,8	<0,0075	<0,0075	86,8	4,29	90,0	7,69	97,7	50,4	3,68
61x	34,6	1,34	109	<75	3,68	30,5	0,0075	<0,0075	111	5,48	86,4	12,8	99,2	48,4	6,11
63	38,5	1,51	33,8	<75	0,13	14,8	<0,0075	<0,0075	111	<2,5	96,2	0,43	96,7	53,9	0,21
68-4	38,6	<1,25	19,6	<75	0,24	6,19	<0,0075	<0,0075	60,9	<2,5	96,4	0,84	97,2	54,0	0,40
69	39,0	2,32	126	<75	0,22	8,63	<0,0075	#####	138	5,77	97,5	0,78	98,3	54,6	0,37
100	38,6	<1,25	30,0	<75	0,33	11,5	<0,0075	<0,0075	114	<2,5	96,5	1,14	97,6	54,1	0,55
101	38,6	<1,25	28,7	<75	0,44	5,19	<0,0075	<0,0075	159	<2,5	96,3	1,53	97,9	54,0	0,73
102	37,4	1,97	53,0	<75	1,29	6,57	<0,0075	<0,0075	226	<2,5	93,4	4,47	97,8	52,3	2,13
103	38,7	<1,25	22,0	<75	0,10	6,31	<0,0075	<0,0075	76,6	<2,5	96,6	0,34	96,9	54,1	0,16
104	38,3	3,68	742	<75	0,39	72,0	<0,0075	<0,0075	295	2,50	95,7	1,35	97,0	53,6	0,65
105	38,1	2,31	701	88,1	0,50	34,6	<0,0075	<0,0075	217	4,16	95,3	1,75	97,0	53,4	0,84
106	39,0	<1,25	75,4	<75	0,34	3,64	<0,0075	<0,0075	144	<2,5	97,3	1,18	98,5	54,5	0,56
107	38,9	<1,25	478	<75	0,23	18,8	<0,0075	<0,0075	84,0	2,88	97,1	0,81	97,9	54,4	0,39
108	39,2	<1,25	338	<75	0,08	11,9	<0,0075	<0,0075	42,2	3,64	97,8	0,29	98,1	54,8	0,14
111a	38,2	1,34	85,2	<75	0,71	5,71	<0,0075	<0,0075	159	2,62	95,4	2,48	97,9	53,5	1,18
111b	37,5	<1,25	48,0	<75	1,01	3,70	<0,0075	#####	107	41,27	93,5	3,51	97,0	52,4	1,68
112	38,4	<1,25	329	<75	0,28	68,3	<0,0075	<0,0075	109	<2,5	95,8	0,98	96,8	53,7	0,47
113a	38,9	<1,25	274	<75	0,29	24,6	<0,0075	<0,0075	57,0	5,52	97,3	1,01	98,3	54,5	0,48
115a	38,8	<1,25	307	<75	0,18	24,3	<0,0075	<0,0075	65,3	2,74	97,0	0,62	97,6	54,3	0,30
115b	38,8	<1,25	306	<75	0,18	24,6	<0,0075	<0,0075	65,5	2,57	97,0	0,63	97,6	54,3	0,30
116	37,8	<1,25	271	<75	0,83	22,3	<0,0075	<0,0075	69,8	5,62	94,5	2,87	97,3	52,9	1,37
117a	38,9	<1,25	502	<75	0,16	117	<0,0075	<0,0075	106	5,81	97,2	0,56	97,7	54,4	0,27
117b	38,1	1,61	400	92,5	0,33	514	<0,0075	#####	105	7,40	95,1	1,16	96,3	53,3	0,56
120	22,1	1,40	854	114,7	12,33	39,2	<0,0075	<0,0075	91,1	12,90	55,2	42,8	97,9	30,9	20,45
121	22,6	2,50	170	<75	11,22	89,7	<0,0075	<0,0075	107	4,08	56,5	38,9	95,4	31,7	18,61
122a	37,4	2,04	920	<75	1,01	49,1	<0,0075	<0,0075	128	6,36	93,3	3,50	96,8	52,3	1,67
123	38,8	1,36	56,0	<75	0,16	7,47	<0,0075	<0,0075	117	<2,5	96,9	0,54	97,4	54,3	0,26
124	38,8	1,30	243	<75	0,42	42,0	<0,0075	<0,0075	121	<2,5	96,8	1,47	98,3	54,2	0,70
125a	39,1	1,51	23,6	<75	0,15	4,61	<0,0075	<0,0075	261	3,87	97,6	0,52	98,1	54,7	0,25
127	38,8	<1,25	125	<75	0,25	22,9	<0,0075	<0,0075	80,9	2,63	96,9	0,88	97,8	54,3	0,42
129	37,6	<1,25	219	<75	0,73	9,55	<0,0075	<0,0075	87,9	<2,5	93,8	2,53	96,4	52,6	1,21
130	37,7	1,36	119	<75	0,67	7,34	<0,0075	<0,0075	79,7	<2,5	94,3	2,32	96,6	52,8	1,11
132a	36,7	<1,25	261	<75	1,70	15,8	<0,0075	<0,0075	64,1	3,15	91,6	5,90	97,5	51,3	2,82
132b	37,2	<1,25	76,0	<75	0,87	16,4	<0,0075	<0,0075	94,7	<2,5	93,0	3,03	96,0	52,1	1,45
134	37,7	<1,25	31,6	<75	0,17	6,84	<0,0075	<0,0075	67,2	<2,5	94,0	0,58	94,6	52,7	0,28
135	37,9	<1,25	107	<75	0,07	15,9	<0,0075	<0,0075	135	<2,5	94,7	0,24	95,0	53,1	0,11
136	37,8	1,71	10,8	<75	0,20	3,84	<0,0075	<0,0075	209	<2,5	94,5	0,70	95,2	53,0	0,33

ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000 xl: Blindwerte, -Standard-, Probenmessung															
	Ca	Ba	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Sr	Zn	CaCO ₃	MgCO ₃	ΣCO ₃	CaO	MgO
137	37,6	1,95	88,2	<75	0,24	11,0	<0,0075	<0,0075	217	<2,5	93,9	0,84	94,7	52,6	0,40
138a	37,4	1,36	38,8	<75	0,56	4,93	<0,0075	<0,0075	326	<2,5	93,5	1,94	95,4	52,4	0,93
138b	24,3	1,97	506	<75	9,83	54,2	0,0129	<0,0075	220	3,18	60,8	34,1	94,9	34,0	16,30
139	38,5	<1,25	13,0	<75	0,24	<2,5	<0,0075	<0,0075	123	<2,5	96,0	0,85	96,9	53,8	0,41
140a	37,6	1,55	1593	78,5	0,37	41,4	<0,0075	#####	219	7,75	94,0	1,27	95,3	52,7	0,61
141	39,1	<1,25	54,4	<75	0,12	7,97	<0,0075	#####	109	<2,5	97,6	0,43	98,0	54,7	0,20
142	38,2	1,33	27,8	<75	0,54	5,31	<0,0075	<0,0075	143	<2,5	95,4	1,87	97,3	53,4	0,89
143	38,7	<1,25	21,3	<75	0,15	5,13	<0,0075	<0,0075	116	<2,5	96,7	0,52	97,2	54,2	0,25
146	39,1	<1,25	20,8	<75	0,17	2,97	<0,0075	<0,0075	111	<2,5	97,6	0,58	98,2	54,7	0,28
147	36,4	1,94	330	<75	2,15	62,9	<0,0075	<0,0075	98,1	3,37	91,0	7,44	98,4	51,0	3,56
148	38,9	<1,25	161	<75	0,21	6,95	<0,0075	<0,0075	93,7	<2,5	97,2	0,73	97,9	54,5	0,35
149	37,9	1,31	434	<75	0,25	89,2	<0,0075	<0,0075	210	<2,5	94,6	0,88	95,4	53,0	0,42
150a	39,2	<1,25	10,3	<75	0,02	<2,5	<0,0075	<0,0075	56,9	<2,5	97,9	0,06	98,0	54,9	0,03
151	38,7	<1,25	12,6	<75	0,04	<2,5	<0,0075	<0,0075	52,5	<2,5	96,7	0,14	96,8	54,2	0,07
215(1346-2)	37,3	1,82	1197	<75	0,56	61,0	<0,0075	<0,0075	132	5,31	93,2	1,94	95,2	52,2	0,93
216(1347)	38,2	2,53	467	<75	0,11	28,0	<0,0075	#####	110	2,67	95,5	0,37	95,9	53,5	0,18
31(TUM20)	38,6	1,47	43,2	<75	0,22	9,14	<0,0075	<0,0075	116	3,32	96,3	0,77	97,1	54,0	0,37
36(TUMx)	38,7	<1,25	23,0	<75	0,13	7,92	0,0081	<0,0075	129	<2,5	96,7	0,46	97,2	54,2	0,22
AS1794L	38,3	1,66	56,6	<75	0,18	5,29	0,0110	<0,0075	92,1	16,42	95,5	0,62	96,1	53,5	0,29
x202.11a	38,8	<1,25	17,2	<75	0,03	<2,5	0,0172	<0,0075	61,0	2,57	96,8	0,12	97,0	54,3	0,06
AS202.4/x	38,5	2,36	44,5	<75	0,11	4,39	<0,0075	<0,0075	117	<2,5	96,2	0,37	96,6	53,9	0,18
AS2.04/x	37,9	1,33	107	<75	0,36	9,84	<0,0075	<0,0075	123	<2,5	94,8	1,24	96,0	53,1	0,59
As206	37,7	<1,25	198	<75	0,35	13,8	<0,0075	<0,0075	118	5,99	94,2	1,20	95,4	52,8	0,57
As208/1/x	36,9	<1,25	246	<75	1,13	23,6	<0,0075	<0,0075	114	2,62	92,1	3,94	96,1	51,6	1,88
As209	38,6	1,88	18,2	<75	0,31	5,22	<0,0075	#####	176	6,26	96,3	1,09	97,4	54,0	0,52
As210/1	36,5	1,62	226	<75	0,23	7,70	<0,0075	#####	111	4,70	91,0	0,80	91,8	51,0	0,38
As211d	38,0	5,16	519	140	0,28	12,3	<0,0075	#####	148	3,14	94,8	0,98	95,8	53,1	0,47
As211hx	38,4	2,89	189	<75	0,31	8,59	<0,0075	<0,0075	136	3,02	95,9	1,06	97,0	53,7	0,51
As212	38,7	<1,25	16,2	<75	0,09	3,70	<0,0075	<0,0075	54,4	<2,5	96,6	0,30	96,9	54,1	0,15
AsMgAT1h	38,1	1,25	34,1	<75	0,69	11,4	<0,0075	<0,0075	82,3	2,81	95,1	2,40	97,5	53,3	1,15
AsMgATSi2d	33,5	1,35	202	<75	3,60	39,0	<0,0075	<0,0075	71,2	8,25	83,6	12,5	96,1	46,9	5,97
AsMgATSi2h	38,8	1,37	16,3	<75	0,19	3,88	<0,0075	<0,0075	151	<2,5	96,9	0,64	97,6	54,3	0,31
BodeMuseumXX	38,7	<1,25	42,8	<75	0,18	15,8	<0,0075	<0,0075	64,3	<2,5	96,7	0,63	97,3	54,2	0,30
Bel-Ay-d	38,9	<1,25	22,2	<75	0,14	3,01	<0,0075	<0,0075	95,5	<2,5	97,2	0,48	97,7	54,5	0,23
Bel-Ay-h	32,2	<1,25	946	<75	4,21	192	<0,0075	#####	186	9,13	80,3	14,6	95,0	45,0	6,99

10.10 ICP-OES: Kontrollmessung certif. Wasser-Standard **SRM 1640** in Ca-Matrix-Lsg. :

	Ca	Ba	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Sr	Zn
	ppm	ppb	ppb	ppm	ppm	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb
SoilSRM1640		74	17,15	0,5	2,91	60,8	14,68	nichtenth.	12,4	26,6
SRM1640		78,37	17,19	0,40	2,91	61,56	16,03	<300	12,50	26,35
SRM1640		80,19	18,39	0,42	2,98	63,41	14,49	<300	12,60	27,64
SRM1640		81,73	18,08	0,41	3,01	63,72	13,91	<300	13,20	27,72
SRM1640		84,71	18,06	0,46	3,18	67,79	15,58	<300	14,30	29,41
SRM1640		78,55	16,26	0,42	2,91	62,45	13,87	<300	12,50	26,50
SRM1640		79,54	16,76	0,41	2,95	63,44	13,83	<300	12,30	27,23
SRM1640		80,57	16,52	0,47	3,05	63,48	16,35	<300	12,30	32,21
MW		80,52	17,32	0,43	3,00	63,69	14,86		12,81	28,15
Abw. Zu Sollwert(%)		8,81	1,00	####	3,07	4,85	1,29		3,34	5,83
SoilSRM1640	7,05	74	17,15	0,497	2,91	60,75	14,675	nichtenth.	124	26,6
SRM1640	6,92	81,5	17,4	0,424	3,03	63,2	15,3	<300	133	27,4
SRM1640	6,91	78,9	17,3	0,416	2,97	61,7	14,7	<300	130	27,4
SRM1640	6,75	79,4	17,0	0,407	2,97	62,4	15,8	<300	130	26,8
SRM1640	7,20	80,2	17,3	0,425	3,02	62,5	14,9	<300	131	28,0
SRM1640	6,85	81,8	17,6	0,425	3,08	63,5	16,2	<300	131	27,4
SRM1640	6,70	80,9	14,8	0,420	2,89	62,2	13,0	<300	130	21,5
SRM1640	6,85	80,0	18,3	0,417	2,87	61,7	12,8	<300	132	26,8
SRM1640	6,69	76,5	16,7	0,392	2,89	60,0	14,8	<300	133	25,8
SRM1640	6,64	78,4	18,4	0,411	2,84	61,1	12,5	<300	133	26,7
SRM1640	6,70	79,7	17,5	0,421	2,89	62,9	12,6	<300	132	27,2
SRM1640	6,76	80,8	18,9	0,422	2,96	63,3	13,5	<300	133	28,2
MW	6,82	79,83	17,37	0,42	2,95	62,23	14,18		131,64	26,66
Abw. Zu Sollwert(%)	-3,33	7,88	1,31	-16,21	1,25	2,43	-3,34		6,16	0,24
SoilCRM399		nichtenth.	101,0	1,49	7,55	99,50	15,20	505	nichtenth.	nichtenth.
CRM399		<5	109,1	1,46	8,06	107,7	18,29	515	<10	<10
CRM399		<5	92,0	1,38	7,93	104,1	16,49	461	<10	<10
CRM399		<5	114,7	1,56	8,10	107,8	19,91	537	<10	<10
CRM399		<5	118,8	1,57	8,21	108,7	20,34	539	<10	<10
CRM399		<5	110,3	1,51	7,99	105,4	16,53	534	<10	<10
CRM399		<5	107,1	1,42	8,02	106,4	15,23	561	<10	<10
CRM399		<5	108,0	1,47	8,23	109,5	15,96	587	<10	<10
CRM399		<5	107,8	1,47	8,03	106,5	14,99	531	<10	<10
CRM399		<5	111,7	1,48	8,10	108,8	15,21	547	<10	<10
MW			108,8	1,48	8,07	107,2	16,99	535		
Abw. Zu Sollwert(%)			7,74	-0,73	6,95	7,77	11,80	5,87		

10.11 Vergleich GFZ (ICP-MS)-----AWI (ICP-OES) für Ba + Sr

Vergleich GFZ (ICP-MS)-----AWI (ICP-OES) für Ba + Sr						
	AWI	GFZ		AWI	GFZ	
Probenbez.	Ba ppm	Ba ppm	Abw. (%)	Sr ppm	Sr ppm	Abw. (%)
29	2,18	2,18	-0,222	226,0	198	14,26
42	1,32	1,28	3,349	251,8	220	14,26
43	1,42	1,44	-1,308	266,4	235	13,43
54	<1,25	1,24		210,3	188	12,06
58(GF)	1,29	1,32	-2,454	237,2	212	11,92
59	<1,25	0,81		139,4	127	9,89
60	<1,25	0,82		86,8	82,6	5,02
61x	1,34	1,35	-0,704	111,4	102	8,95
63	1,51	1,43	5,168	110,6	104	6,40
68-4	<1,25	0,72		60,9	61,8	-1,36
69	2,32	2,40	-3,150	138,2	127	8,91
100	<1,25	0,79		114,1	106	7,90
101	<1,25	1,03		159,2	143	11,25
102	1,97	1,97	0,356	225,8	200	13,07
103	<1,25	0,75		76,6	75,3	1,72
104	3,68	3,40	7,998	294,7	255	15,70
105	2,31	2,39	-3,300	216,6	193	11,96
106	<1,25	1,02		143,8	133	8,29
107	<1,25	0,36		84,0	79,6	5,53
108	<1,25	0,40		42,2	46,1	-8,54
111a	1,34	1,33	0,478	158,7	144	10,50
111b	<1,25	1,65		106,6	100	6,53
112	<1,25	0,85		109,0	103	5,47
113a	<1,25	1,15		57,0	58,5	-2,56
115a	<1,25	0,52		65,3	65,1	0,41
115b	<1,25	0,51		65,5	65,0	0,76
116	<1,25	0,85		69,8	66,5	4,93
117a	<1,25	0,75		106,0	95,1	11,51
117b	1,61	1,80	-10,394	104,5	94,7	10,41
120	1,40	1,29	8,846	91,1	86,0	5,90
121	2,50	2,38	5,171	106,6	96,7	10,21
122a	2,04	2,07	-1,463	128,2	113	13,42
123	1,36	1,51	-9,833	116,6	106	9,99
124	1,30	1,75	-25,649	120,7	109	10,52
125a	1,51	1,58	-4,637	260,5	226	15,51
127	<1,25	0,86		80,9	76,4	5,88
129	<1,25	1,30		87,9	83,4	5,30
130	1,36	1,58	-14,263	79,7	76,7	3,91
132a	<1,25	0,93		64,1	62,8	2,09
132b	<1,25	1,00		94,7	85,5	10,76
134	<1,25	0,68		67,2	61,5	9,32
135	<1,25	0,42		134,6	117	15,21
136	1,71	1,90	-9,947	208,9	175	19,44
137	1,95	1,89	2,688	217,1	180	20,43

Vergleich GFZ (ICP-MS)-----AWI (ICP-OES) für Ba + Sr						
	AWI	GFZ		AWI	GFZ	
Probenbez.	Ba ppm	Ba ppm	Abw. (%)	Sr ppm	Sr ppm	Abw. (%)
138a	1,36	1,36	-0,551	326,4	260	25,32
138b	1,97	2,11	-6,831	220,2	178	23,79
139	<1,25	1,03		123,4	103	19,49
140a	1,55	1,62	-4,766	219,4	179	22,39
141	<1,25	0,79		109,1	91,9	18,66
142	1,33	1,44	-7,126	142,9	118	21,11
143	<1,25	1,26		116,1	97,6	18,93
146	<1,25	1,11		111,4	94,0	18,56
147	1,94	1,97	-1,409	98,1	83,8	17,08
148	<1,25	0,67		93,7	79,7	17,60
149	1,31	1,38	-5,144	210,2	171,3	22,71
150a	<1,25	0,67		56,9	61,5	-7,60
151	<1,25	0,65		52,5	57,4	-8,52
215(1346-2)	1,82	2,00	-8,956	131,9	127	3,53
216(1347)	2,53	2,40	5,650	110,3	103	6,56
31(TUM20)	1,47	1,44	2,386	115,7	110	5,36
36(TUMx)	<1,25	0,68		129,1	120	7,82
AS1794L	1,66	1,67	-0,778	92,1	89,6	2,74
x202.11a	<1,25	1,52		61,0	63,8	-4,36
AS202.4/x	2,36	2,54	-6,991	116,8	110	6,49
AS2.04/x	1,33	1,25	6,365	122,5	114	7,41
As206	<1,25	0,36		118,3	110	7,84
As208/1/x	<1,25	0,64		114,0	106	8,07
As209	1,88	1,90	-1,137	175,7	156	12,47
As210/1	1,62	1,67	-3,136	110,9	109	2,03
As211d	5,16	5,12	0,853	148,1	135	10,15
As211hx	2,89	2,85	1,123	135,9	123	10,20
As212	<1,25	0,60		54,4	55,4	-1,81
AsMgAT1h	1,25	1,35	-7,566	82,3	77,2	6,65
AsMgATSi2d	1,35	1,40	-3,975	71,2	68,9	3,47
AsMgATSi2h	1,37	1,41	-2,453	151,4	136	11,56
Bode MuseumXX	<1,25	0,70		64,3	63,2	1,71
Bel-Ay-d	<1,25	1,09		95,5	91,0	4,89
Bel-Ay-h	<1,25	0,43		186,4	162	14,76
Anzahl	40,00	78,00	40,00	78,00	78,00	78,00
MW	1,84	1,37	-2,44	130,32	117,17	9,15
Stdabw.	0,75	0,76	6,49	62,68	50,73	7,36
Max	5,16	5,12	8,85	326,36	260,42	25,32
Min	1,25	0,36	-25,65	42,21	46,14	-8,54
Median	1,61	1,32	1,40	114,07	103,903	9,148

10.12 Isotopenmessung am AWI: Standard KH-2 und Proben (Auszug)

SAmples/Standard	SA Intens.	ST Intens.	Std.Err. 13C	d13C, PDB	Std.Err. 18O	d18O, PDB	d18O, SMOW
KH-2	3,3	3,2	0,014	1,78	0,026	-2,94	27,88
1	3,2	3,2	0,005	3,26	0,010	-4,84	25,92
2	3,2	3,2	0,006	2,87	0,013	-1,85	29,00
5	3,2	3,2	0,009	2,31	0,015	-8,68	21,96
6	2,2	3,2	0,006	0,61	0,020	-12,96	17,55
7	3,2	3,2	0,007	2,31	0,017	-1,01	29,87
KH-2	3,2	3,2	0,009	1,81	0,011	-2,91	27,91
8	0,4	3,2					
9	3,2	3,2	0,008	2,41	0,009	-1,17	29,70
11	3,2	3,2	0,007	3,08	0,010	-2,12	28,72
28	3,2	3,2	0,007	2,59	0,007	-3,39	27,41
33	3,2	3,2	0,005	2,61	0,013	-0,90	29,99
KH-2	2,2	3,2	0,008	1,88	0,016	-2,68	28,15
6	3,2	3,2	0,005	2,28	0,012	-9,13	21,50
3	3,2	3,2	0,005	-10,19	0,012	-8,67	21,97
4	3,2	3,2	0,005	3,50	0,009	-1,74	29,12
10	3,2	3,2	0,004	-11,33	0,010	-8,16	22,49
KH-2	3,2	3,2	0,004	1,78	0,010	-3,07	27,74
13	3,2	3,2	0,007	3,12	0,006	-2,30	28,54
14	3,2	3,2	0,006	0,10	0,010	-13,74	16,75
15	3,2	3,2	0,006	1,39	0,016	-11,81	18,73
16	3,2	3,2	0,008	3,81	0,010	-15,71	14,72
17	3,1	3,2	0,006				
KH-2	3,0	2,9	0,007	1,95	0,012	-3,12	27,69
12	3,0	2,9	0,007	3,51	0,011	-2,39	28,44
18	3,0	2,9	0,007	4,49	0,011	-13,31	17,19
19	3,0	2,9	0,005	3,72	0,007	-13,99	16,49
20	3,0	3,0	0,011	4,53	0,027	-13,58	16,91
21	1,6	2,1					
KH-2	2,9	3,0	0,011	1,95	0,028	-3,07	27,74
22	3,1	3,1	0,011	-0,12	0,021	-4,24	26,54
23	3,0	3,0	0,012	2,21	0,022	-5,46	25,28
24	3,0	3,0	0,009	2,84	0,021	-7,07	23,62
26	3,0	3,0	0,012	4,54	0,024	-3,84	26,95
27	3,0	3,0					
KH-2	3,0	3,0	0,010	1,96	0,031	-2,96	27,86
29	3,0	3,0	0,011	2,75	0,021	-1,58	29,28
30	3,0	3,0	0,011	2,75	0,017	-10,92	19,66
31	3,0	3,0	0,010	2,75	0,017	-4,46	26,31
39	2,9	3,0	0,014	2,73	0,025	-0,93	29,96
41	2,9	3,0	0,016	2,82	0,030	-0,60	30,29
KH-2	3,0	3,0	0,014	1,96	0,026	-3,02	27,80
8	3,0	3,0	0,003	2,70	0,010	-1,53	29,33
12	3,0	3,0	0,006	3,47	0,004	-2,19	28,65
42	3,0	3,0	0,003	2,75	0,014	-0,74	30,14
KH-2	3,0	3,0	0,013	1,90	0,017	-3,15	27,67
17	2,9	3,0	0,010	4,50	0,009	-12,99	17,52
43	3,0	3,0	0,009	2,78	0,015	-0,75	30,14
53	3,0	3,0	0,004	2,76	0,005	-1,11	29,77
Nr14(HK)	3,0	3,0	0,009	0,64	0,003	-3,75	27,04
Nr15(HK)	3,0	3,0	0,005	2,11	0,012	-3,90	26,89
KH-2	3,0	3,0	0,009	1,89	0,009	-3,12	27,70

SAMple/Standard	SA Intens.	ST Intens.	Std.Err. 13C	d13C, PDB	Std.Err. 18O	d18O, PDB	d18O, SMOW
Nr19(EK)	2,9	3,0	0,010	2,80	0,014	-8,31	22,34
Nr20(EK)	3,0	3,0	0,009	1,80	0,015	-5,59	25,14
Nr31(Tha)	3,0	3,0	0,008	3,10	0,015	-1,93	28,92
KA P1dK	3,0	3,0	0,008	1,56	0,018	-1,68	29,18
SAL P1	3,0	3,0	0,004	2,90	0,014	-1,62	29,24
KH-2	3,0	3,0	0,006	1,92	0,018	-3,01	27,80
47	3,0	3,0	0,009	2,82	0,018	-0,53	30,36
51	3,0	3,0	0,010	2,52	0,026	-1,85	29,01
54	3,0	3,0	0,006	2,78	0,018	-5,30	25,44
Hara P	3,0	3,0	0,005	2,60	0,009	-4,90	25,86
HS Pergamon	2,9	2,9	0,006	0,28	0,011	-1,91	28,94
Ephesos	3,0	2,9	0,005	2,59	0,006	-2,49	28,35
Nr4(MT)	3,0	2,9	0,006	1,33	0,011	-5,62	25,12
Nr5(MT)	3,0	2,9	0,006	1,39	0,008	-7,55	23,12
Nr6(MT)	3,0	2,9	0,003	2,44	0,008	-2,72	28,11
STANDARD KH-2				1,78		-2,94	
				1,81		-2,91	
				1,88		-2,68	
				1,78		-3,07	
				1,95		-3,12	
				1,95		-3,07	
				1,96		-2,96	
				1,96		-3,02	
				1,90		-3,15	
				1,89		-3,12	
1,92		-3,01					
			mean	1,89		-3,00	
			stabwn	0,07		0,13	
			N	11		11	
			Soll:	1,92		-2,87	

10.13 Korrelationen (PEARSON, 1966) der geochemischen Messwerte

	Qz	Cc	Dol	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣSEE	Hf	Pb	Th	U	Rb	SrMS	Zr	Cs	Ba	Ca OES	Ba OES	Fe OES	Mg OES	Mn OES	P OES	Sr OES	Zn OES	δO	δC
Qz	1,00	.01	-.02	.02	.10	.01	.01	-.01	-.02	-.03	.00	-.04	-.05	-.06	-.06	-.07	-.06	-.04	.02	.22	-.02	.28**	.20*	.54**	.15	-.06	.58**	.09	.23*	.05	.24**	-.23*	.10	.14	.11	-.18	-.28**	-.22**
Cc	.01	1,00	-.06	-.06	-.12	-.06	-.06	.01	.00	.02	-.01	.03	.05	.03	.05	-.05	.05	.03	-.06	.18	-.09	-.13	-.05	-.21	.07	.00	-.10	.03	.95**	.07	-.26**	-.97**	-.13	.04	.06	-.06	.13	.11
Dol	-.02	1,00**	1,00	.06	.12	.06	.06	-.01	.00	-.02	.01	-.03	-.05	-.03	-.04	.05	-.05	-.03	.06	-.18	.09	.13	.05	.21	-.07	.00	.10	-.03	-.95**	-.07	.26**	.97**	.13	-.04	-.06	.06	-.13	-.10
La	.02	-.06	.06	1,00	.95**	1,00**	1,00**	.99**	.97**	.96**	.97**	.96**	.84**	.95**	.94**	.88**	.95**	.96**	.96**	.91**	.29**	.68**	.00	.10	-.12*	.31**	.08	.31**	-.06	-.13	.37**	.04	.22**	.21	-.09	.50**	-.18**	-.04
Ce	.10	-.12	.12	.95**	1,00	.99**	.99**	.97**	.95**	.92**	.94**	.92**	.75**	.91**	.90**	.84**	.93**	.94**	.98**	.95**	.26**	.76**	.07	.15	-.08	.40**	.11	.41**	-.14*	-.05	.65**	.11	.32**	.06	-.01	.52**	-.15**	-.05
Pr	.01	-.06	.06	1,00**	.99**	1,00	1,00**	.99**	.98**	.96**	.97**	.95**	.82**	.94**	.94**	.95**	.96**	.96**	1,00**	.94**	.29**	.77**	.03	.15	-.12*	.39**	.12	.45**	-.07	-.05	.42**	.06	.29**	.08	-.09	.52**	-.19**	-.04
Nd	.01	-.06	.06	1,00**	.99**	1,00	1,00**	.98**	.96**	.97**	.96**	.96**	.83**	.95**	.94**	.95**	.96**	.96**	1,00**	.93**	.29**	.75**	.01	.16	-.14*	.37**	.13	.38**	-.08	-.11	.41**	.06	.31**	.08	-.10	.50**	-.20**	-.04
Sm	-.01	.01	-.01	.99**	.97**	.99**	1,00**	1,00	.99**	.98**	.98**	.97**	.86**	.96**	.95**	.91**	.95**	.96**	.98**	.92**	.26**	.71**	.00	.20	-.18**	.36**	.16	.42**	.01	-.06	.33**	.01	.33**	-.04	-.14*	.43**	-.20**	-.04
Eu	-.02	.00	.00	.97**	.95**	.98**	.98**	.99**	1,00	.99**	.99**	.98**	.88**	.97**	.97**	.86**	.96**	.96**	.96**	.89**	.25**	.65**	-.01	.24	-.21**	.32**	.19	.34**	-.02	-.14	.25**	.03	.28**	-.01	-.17*	.42**	-.21**	-.06
Gd	-.03	.02	-.02	.96**	.92**	.96**	.96**	.98**	.99**	1,00	1,00**	.99**	.93**	.98**	.98**	.88**	.96**	.96**	.93**	.84**	.22**	.50**	-.05	.21	-.19**	.24**	.16	.24**	.02	-.12	.22**	-.01	.25**	.01	-.14*	.36**	-.22**	-.04
Tb	.00	-.01	.01	.97**	.94**	.97**	.97**	.98**	.99**	1,00**	1,00	1,00**	.93**	.99**	.99**	.89**	.98**	.98**	.95**	.81**	.19**	.47**	-.04	.21	-.24**	.22**	.16	.27**	-.02	-.09	.18*	.04	.22**	-.01	-.18*	.34**	-.21**	-.04
Dy	-.04	.03	-.03	.96**	.92**	.95**	.96**	.97**	.98**	.99**	1,00**	1,00	.94**	1,00**	.99**	.99**	.99**	.98**	.92**	.76**	.20**	.39**	-.07	.23	-.19**	.19**	.17	.19**	.02	-.13	.18**	-.02	.20**	-.01	-.12	.34**	-.22**	-.03
Y	-.05	.05	-.05	.84**	.75**	.82**	.83**	.86**	.88**	.93**	.93**	.94**	1,00	.95**	.96**	.94**	.92**	.91**	.75**	.44**	.15*	.15*	-.11	.09	-.11*	.05	.05	.05	.02	-.12	.13*	-.03	.13*	.11	-.08	.31**	-.17**	.03
Ho	-.06	.03	-.03	.95**	.91**	.94**	.95**	.96**	.97**	.98**	.99**	1,00**	.95**	1,00	1,00**	1,00**	.99**	.99**	.91**	.66**	.16*	.31**	-.08	.23	-.22**	.11	.17	.19**	.03	-.07	.11	-.01	.15*	.08	-.15*	.34**	-.18**	.00
Er	-.06	.05	-.04	.94**	.90**	.94**	.94**	.95**	.97**	.98**	.99**	.99**	.96**	1,00**	1,00	1,00**	.99**	.99**	.90**	.61**	.17**	.28**	-.10	.24	-.17**	.13*	.17	.13*	.02	-.14	.14*	-.02	.15*	.04	-.10	.35**	-.18**	.00
Tm	-.07	-.05	.05	.88**	.84**	.95**	.95**	.91**	.86**	.88**	.89**	.99**	.94**	1,00**	1,00**	1,00	.88**	.94**	.79**	.58**	.13	.28**	-.09	.27	-.27**	.10	.20	.17*	.03	-.12	.12	.01	.12	.04	-.18*	.43**	-.16**	-.03
Yb	-.06	.05	-.05	.95**	.93**	.96**	.96**	.95**	.96**	.96**	.98**	.99**	.92**	.99**	.99**	.88**	1,00	1,00**	.92**	.52*	.16*	.25**	-.10	.29*	-.20**	.12	.22*	.12	.02	-.16	.13	.01	.11	-.17	-.13	.37**	-.17**	-.02
Lu	-.04	.03	-.03	.96**	.94**	.96**	.96**	.96**	.96**	.98**	.98**	.98**	.91**	.99**	.99**	.94**	1,00	1,00**	.93**	.42*	.13	.22*	-.08	.29	-.25**	.07	.23*	.16*	.03	-.11	.11	.01	.08	-.15	-.16*	.39**	-.19**	-.04
ΣSEE	.02	-.06	.06	.96**	.98**	1,00**	1,00**	.98**	.96**	.93**	.95**	.92**	.75**	.91**	.90**	.79**	.92**	.93**	1,00	.93**	.28**	.73**	.02	.16	-.11	.36**	.12	.37**	-.08	-.11	.44**	.05	.29**	.12	-.07	.49**	-.20**	-.05
Hf	.22	.18	-.18	.91**	.95**	.94**	.93**	.92**	.89**	.84**	.81**	.76**	.44*	.66**	.61**	.58**	.52*	.42*	.93**	1,00	.86**	.98**	.51**	.97**	-.03	.93**	.96**	.95**	-.15	.18	.47*	-.11	.12	a	-.02	-.67	-.47**	-.13
Pb	-.02	-.09	.09	.29**	.26**	.29**	.29**	.26**	.25**	.22**	.19**	.20**	.15*	.16*	.17**	.13	.16*	.13	.28**	.86**	1,00	.28**	-.01	.17	.13*	.14*	.15	.19**	-.10	-.08	.21**	.11	.24**	.46**	-.06	.29**	-.27**	.04
Th	.28**	-.13	.13	.68**	.76**	.77**	.75**	.71**	.65**	.50**	.47**	.39**	.15	.31**	.28**	.28**	.25**	.22*	.73**	.98**	.28**	1,00	.09	.17	-.05	.71**	.14	.67**	-.20*	-.06	.68**	.14	.23**	-.08	.02	.16	-.14	-.03
U	.20*	-.05	.05	.00	.07	.03	.01	.00	-.01	-.05	-.04	-.07	-.11	-.08	-.10	-.09	-.10	-.08	.02	.51**	-.01	.09	1,00	-.03	.11	.13*	-.01	.07	-.47**	.01	.10	.46**	.01	.27	-.01	.06	.04	-.10
Rb	.54**	-.21	.21	.10	.15	.15	.16	.20	.24	.21	.21	.23	.09	.23	.24	.27	.29*	.29	.16	.97**	.17	.17	-.03	1,00	-.23	.21	.99**	.76**	-.09	.00	.61**	.15	.08	-.17	.05	.38	-.24	-.23
Sr-MS	.15	.07	-.07	-.12*	-.08	-.12*	-.14*	-.18**	-.21**	-.19**	-.24**	-.19**	-.11*	-.22**	-.17**	-.27**	-.20**	-.25**	-.11	-.03	.13*	-.05	.11	-.23	1,00	.01	-.15	.23**	.16*	.52**	.01	-.13*	-.03	.01	.99**	-.02	-.16*	.28**
Zr	-.06	.00	.00	.31**	.40**	.39**	.37**	.36**	.32**	.24**	.22**	.19**	.05	.11	.13*	.10	.12	.07	.36**	.93**	.14*	.71**	.13*	.21	.01	1,00	.15	.34**	.00	-.05	.03	-.04	-.05	.01	-.02	-.06	-.13*	-.03
Cs	.58**	-.10	.10	.08	.11	.12	.13	.16	.19	.16	.17	.05	.17	.17	.20	.22*	.23*	.12	.96**	.15	.14	-.01	.99**	-.15	.15	1,00	.75**	.03	.14	.42**	.06	.07	.72	.11	.00	-.24*	-.23*	
Ba	.09	.03	-.03	.31**	.41**	.45**	.38**	.42**	.34**	.24**	.27**	.19**	.05	.19**	.13*	.17*	.12	.16*	.37**	.95**	.19**	.67**	.07	.76**	.23**	.34**	.75**	1,00	.08	1,00**	-.03	-.02	.00	.18	.51**	-.03	-.16*	-.05
Ca	.23*	.95**	-.95**	-.06	-.14*	-.07	-.08	.01	-.02	.02	-.02	.02	.02	.03	.02	.03	.02	.03	-.08	-.15	-.10	-.20*																

10.14 Datensätze der Proben mit wichtigsten erfaßten Merkmalen

a/q: antikes Objekt/Quarry, MRCC: Farbe nach Munsell Rock-Color Chart,

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC		
Afrodias	Afr1_modCcw_138a	q			0,291	1,01878	w	N9- N8	0,712	0,16	0,117	0,444	0,084	0,018	0,083	0,011	0,072	0,548	0,014	0,040	< 0,007	0,039	< 0,005	38,8	0,56	4,93	326	< 2,5	0,12	-5,02	1,95		
Afro	Afr1_modDolrosa_138b	q	2,8	0,71	0,038	86,8816	rosa	10YR 8/2	1,01	0,904	0,215	0,877	0,162	0,045	0,198	0,029	0,184	1,17	0,039	0,106	0,012	0,088	0,011	506	9,83	54,2	220	3,18	2,30	-4,72	1,44		
Afro	Afr10	q	2,6	1,11			w	N9																									
Afro	Afr13b_mod_149	q	3,8	1,11			w	N9+ 5Y 8/1	0,913	0,89	0,141	0,598	< 0,1	< 0,02	0,142	0,023	0,150	1,85	0,029	0,097	< 0,01	0,067	< 0,01	434	0,25	89,2	210	< 2,5	2,06	-6,03	1,85		
Afro	Afr2	q	2,6	0,95			w	N9+ N8																									
Afro	Afr2_139	q	2,6	0,95			w	N9- 5Y 8/1	0,095	0,13	0,016	0,064	< 0,03	< 0,01	0,019	< 0,007	< 0,02	0,316	< 0,007	0,018	< 0,007	0,015	< 0,005	13,0	0,24	2,50	123	< 2,5	0,10	-3,31	2,47		
Afro	Afr3antCcwgr_140a	q	3	0,71	0,279	0	w	N9	1,56	2,32	0,317	1,35	0,273	0,066	0,303	0,042	0,283	2,76	0,060	0,190	0,024	0,147	0,021	1593	0,37	41,4	219	7,75	7,26	-4,62	1,30		
Afro	Afr3gw_140b	q	1,6	0,71			g	5B 5/1																									
Afro	Afr4	q	3,2	1,05			w	N9																									
Afro	Afr4_141	q	4	0,77			w	5YR 8/1- 5Y8/1	0,434	0,18	0,053	0,212	0,039	< 0,01	0,062	0,008	0,068	1,05	0,017	0,061	< 0,007	0,051	0,008	54,4	0,12	7,97	109	< 2,5	0,50	-4,03	1,61		
Afro	Afr5/2	q	3,2	1,05			w		0,05	0,04	< 0,01	< 0,05	< 0,007	< 0,01	< 0,04	< 0,006	< 0,02	0,22	< 0,007	0,012	< 0,007	< 0,01	< 0,008	18,6	0,40	4,42	112	< 2,5	0,17	-3,36	2,36		
Afro	Afr5_142	q	3,2	1,05	0,254	0,54499	w	N9	0,073	0,08	< 0,001	0,049	< 0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,007	< 0,02	0,233	< 0,007	< 0,02	< 0,007	< 0,01	< 0,005	27,8	0,54	5,31	143	< 2,5	0,19	-4,22	1,74		
Afro	Afr6/2	q	2,8	0,77	0,236	0	w		0,120	0,06	0,014	0,069	< 0,007	< 0,01	< 0,04	< 0,006	0,018	0,24	< 0,007	0,014	< 0,007	< 0,01	< 0,008	16,7	0,15	4,73	85,8	< 2,5	0,19				
Afro	Afr6_143	q	2,8	0,77			w	5Y 9/1	0,144	0,10	0,021	0,096	< 0,03	< 0,01	0,027	< 0,007	< 0,02	0,280	< 0,007	0,014	< 0,007	0,013	< 0,005	21,3	0,15	5,13	116	< 2,5	0,18	-3,89	2,21		
Afro	Afr9_145	q	2,8	0,67			rot	N4- N9+ 5Y 8/1																									
Benin	Ben1	q	7,2	2,86			w	N8.8	0,391	1,00	0,112	0,568	0,126	0,032	0,147	0,018	0,149	1,29	0,034	0,097	0,012	0,077	0,011	27,2	0,22	2,50	1451	2,87	0,02	-4,19	6,39		
Benin	BenDol2	q			2,66	67,8266	d																										
BG aq	Strat15_112	q	1,6	0,57	0,262	0,25411	w	N9- 10Yr 6/2 & 10YR 8/6	0,790	0,86	0,215	0,811	0,174	0,035	0,141	0,020	0,113	0,528	0,018	0,051	< 0,007	0,054	0,006	329	0,28	68,3	109	< 2,5	3,01	-4,83	1,81		
BG aq	Strat16gelb_dol_113b	q	1,6	0,4	0,173	9,2689	gel																										
BG aq	Strat16gelb_dol_113x	q			0,244	11,7592	gel	N9 & 10YR 8/6																									
BG aq	Strat16w_113a	q	2	0,55	0,291	0,63903	w	N9- N8 & 10YR 8/6	0,647	0,78	0,144	0,664	0,140	0,033	0,156	0,021	0,140	1,34	0,027	0,077	0,009	0,055	0,007	274	0,29	24,6	57,0	5,52	4,81	-4,13	-0,02		
BG aq	Strat17_114	q	1,4	0,53	1,174	0	gr	N7- N5 & 10YR 6/6																									
BG aq	Strat18wCc_115a	q	2,6	0,5	0,374	0	w	N9	1,11	1,81	0,216	0,848	0,158	0,030	0,159	0,027	0,155	1,04	0,029	0,095	0,011	0,081	0,011	307	0,18	24,3	65,3	2,74	4,70	-3,35	0,85		
BG aq	Strat18wCc_115b	q	1,4	0,31	0,451	0,36228	w	N9 & 5R 3/4	1,11	1,85	0,216	0,849	0,164	0,031	0,171	0,022	0,150	1,04	0,031	0,091	0,012	0,082	0,012	306	0,18	24,6	65,5	2,57	4,68	-4,02	0,66		
BG aq	StratWkav-20	q	1,2	0,33			w	N9 & 10YR 8/2	0,593	0,73	0,128	0,522	0,108	0,026	0,102	0,014	0,094	0,58	0,016	0,041	< 0,007	0,036	< 0,008	131,0	0,27	11,80	48,2	< 2,5	2,72	-3,58	1,41		
BG aq	StratWkav20Ccdol_116	q	1,4	0,63	0,287	3,88984	w	N9	0,709	0,95	0,192	0,806	0,181	0,043	0,199	0,028	0,167	1,01	0,034	0,092	0,012	0,058	0,009	271	0,83	22,3	69,8	5,62	3,88	-3,17	1,14		
BG aq	StratWkav21Cc_117a	q	1,2	0,4	0,082	0	w	N9 & 5R 3/4	0,478	0,60	0,158	0,768	0,199	0,046	0,207	0,025	0,137	0,713	0,021	0,057	< 0,007	0,042	< 0,005	502	0,16	117	106	5,81	4,73	-4,07	1,45		
BG aq	StratWkav21Cc_117b	q	1,2	0,48	0,6	0	w	N9 & 5R 3/4	1,02	1,24	0,364	1,84	0,535	0,131	0,668	0,096	0,552	3,14	0,104	0,261	0,027	0,151	0,019	400	0,33	514	105	7,40	3,83	-3,83	1,32		
BG aq	StratWkav24Ccdol_119	q	1	0,24	0,561	8,93187	rot	5R 3/4 & N9																									
BG E	Saricmod_147q	q					w	N9	1,15	0,61	0,186	0,845	0,157	0,046	0,259	0,034	0,246	3,09	0,053	0,173	0,019	0,129	0,018	330	2,15	62,9	98,1	3,37	3,36	-4,81	3,70		
BG E	Saricmod_P13_111a	q			0,197	4,39771	gr	N6- N7	1,04	0,499	0,119	0,464	0,081	0,018	0,106	0,014	0,099	1,25	0,020	0,068	< 0,007	0,045	< 0,006	85,2	0,71	5,71	159	2,62	0,54	-3,11	1,52		
BG E	Saricmod_P13_111b	q	1	0,27	0,092	4,1697	w	N8-N7	0,631	1,75	0,132	0,525	0,104	0,017	0,095	0,012	0,084	0,619	0,016	0,046	< 0,007	0,041	0,006	48,0	1,01	3,70	107	41,27	0,45	-2,65	2,23		
BG Euromos	Eur_146	q	1,2	0,48			w	5GY 7/1	0,057	0,12	0,011	0,063	< 0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,007	< 0,02	0,078	< 0,007	< 0,02	< 0,007	< 0,01	< 0,005	20,8	0,17	2,97	111	< 2,5	0,19	-4,12	1,92		
BG Eu	Eur_Eu6	q					w																										
BG Eu	Eur_EuG2	q	1	0,62	0,374	0,42576	w		1,27	2,06	0,231	0,835	0,149	0,028	0,141	0,019	0,134	1,11	0,024	0,081	0,010	0,067	0,009	625,8	0,48	60,08	226	< 2,5	2,77				
BG Eu	Eur_G_Eu6	q					w		1,49	2,87	0,317	1,20	0,222	0,045	0,207	0,031	0,189	1,23	0,037	0,104	0,015	0,096	0,013	917,4	0,39	32,7	317,9	< 5	2,89	-8,31	2,80		
BG Eu	Eur_G_Eu8_1	q					w		0,581	1,02	0,115	0,385	0,075	0,015	0,064	0,010	0,059	0,428	0,011	0,035	0,005	0,029	0,004	374,3	0,50	42,7	162,5	< 5	2,30	-5,59	1,80		
BG Eu	Eur_G_Eu8_2	q					w																										
BG Eu	Eur_P_6a_105c	q					w																										
BG Eu	Eur_P6_104	q	2,6	0,53	0,259	0,35546	w	N-8 N7- N6	1,06	1,84	0,211	0,783	0,140	0,032	0,167	0,021	0,142	1,05	0,028	0,088	0,011	0,076	0,009	742	0,39	72,0	295	2,50	2,52	-7,19	2,12		
BG Eu	Eur_P6_105b	q	2	0,56			w																										
BG Eu	Eur_P6a_105	q	2,2</																														

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC							
Herakleia	Hk_Agora_HK 11	a	2	1,11			w	N9-N8 & N7																							-1,81	2,35						
BG Hk	Hk_bruch_Hk16	q	2	0,83			wg	N 8																														
BG Hk	Hk_bruch_Hk17	q					w																															
BG HK	Hk_Buc_Hk22	q	1,6	0,69			w		3,61	3,45	0,601	2,42	0,485	0,118	0,625	0,095	0,635	10,2	0,151	0,472	0,062	0,388	0,055									-3,75	0,64					
BG HK	Hk_Buc_Hk23	q	3,4	1,1			w		0,037	0,03	0,004	0,019	0,004	0,001	0,005	0,001	0,007	0,111	0,001	0,006	0,001	0,005	0,001	18,2	0,13	7,48	59,6	< 5	0,31			-3,90	2,11					
BG HK	Hk_Cc_P5_103	q	3,6	0,95			w	N9	0,147	0,14	0,020	0,087	< 0,02	< 0,008	0,029	< 0,008	0,038	0,797	0,010	0,041	< 0,007	0,043	0,007	22,0	0,10	6,31	76,6	< 2,5	0,29			-2,99	1,68					
BG Hk	Hk_Endym_HK 12	a	2,2	1,11			w	N8 & N6																									-2,69	2,41				
BG HK	Hk_geb_P4_102	q	2	0,71	0,334	5,10612	wg	N7- N8- N6- N5	0,667	0,62	0,125	0,495	0,087	0,024	0,091	0,014	0,087	0,583	0,016	0,046	< 0,007	0,036	< 0,006	53,0	1,29	6,57	226	< 2,5	0,23			-2,73	2,21					
BG Hk	Hk_LatmKammergr_HK 13	a	3	0,83			w																											-3,21	1,37			
BG Hk	Hk_mbruch_Hk4	q	4	1			w	N8- N9																														
BG Hk	Hk_regenbr_HK 5	q	3,2	0,91			w		0,088	0,10	0,014	0,083	0,019	< 0,01	< 0,04	< 0,006	0,029	0,47	< 0,007	0,021	< 0,007	0,023	< 0,008	47,1	0,07	9,81	47,2	2,57	1,00			-3,31	1,12					
BG Hk?	Hk_ARM_32_h	q					w		1,03	0,72	0,150	0,585	0,118	0,025	0,153	0,020	0,133	1,36	0,027	0,081	0,011	0,054	< 0,008	9,5	0,04	2,50	171	< 2,5	0,06			-7,19	3,38					
Milet Ost	MT-O_GB_Mt 7	q					w	N8																											-2,66	2,41		
BG MT O	MT-O_GB_MT12	q					w	N8-N8,5																											-2,40	2,44		
BG MT O	MT-O_GB_Mt9	q					w	N8																														
BG MT O	MT-O_GB-MT10	q					w	N8	0,09	0,05	0,007	0,048	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	0,015	0,31	< 0,006	0,014	< 0,004	0,011	< 0,005	22,9	0,35	14,33	121	< 2,5	0,19			-2,33	2,29					
BG MT O	MT-O_GB-MT11	q	1,6	0,95			w	N8-N7,5	0,043	0,02	< 0,006	< 0,02	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	< 0,006	0,134	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	13,8	0,15	8,40	81,4	< 2,5	0,17			-3,18	2,51					
BG MT O	MT-O_GB-MT16	q					w	N8	0,291	0,16	0,047	0,192	0,035	< 0,007	0,039	< 0,005	0,042	0,44	0,007	0,030	< 0,004	0,029	< 0,005	54,5	0,77	7,36	110	< 2,5	0,49			-1,58	2,35					
BG MT O	MT-O_G-MT14	q	1	0,74			w	N7-N8																											-2,21	2,24		
BG MT O	MT-O_G-MT18	q	1,8	0,71			w	N8-N6																												-2,71	2,39	
BG MT O	MT-O_G-MT19	q					wg	N7-N8																												-1,66	2,38	
BG MT O	MT-O_G-MT2_1	q	1,2	0,55			w	N9,5-N8 +5YR 6/1	1,84	0,72	0,159	0,594	0,107	0,029	0,118	0,016	0,109	1,71	0,026	0,080	0,008	0,070	0,011	86,5	0,33	27,26	79,3	< 2,5	1,09					-2,96	0,95			
BG MT O	MT-O_G-MT2_2	q	1,2	0,55			w																													-3,00	0,80	
BG MT O	MT-O_graustr-MT3	q	1	0,54			wg	N4+N8	0,06	0,05	< 0,006	0,027	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	< 0,006	0,13	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	13,8	0,21	42,09	309	< 2,5	0,04					-3,07	2,80			
BG MT O	MT-O_P1_100	q	1,4	0,55	0,12	0,16242	w	N8+ N9	0,062	0,08	0,009	0,043	< 0,02	< 0,008	< 0,02	< 0,008	< 0,02	0,094	< 0,007	< 0,01	< 0,007	< 0,01	< 0,006	30,0	0,33	11,5	114	< 2,5	0,26					-2,65	2,33			
BG MT O	MT-O_P2_101	q	1,6	0,53	0,298	0,39198	w	N8-N7	0,139	0,13	0,023	0,093	< 0,02	< 0,008	0,021	< 0,008	< 0,02	0,230	< 0,007	0,016	< 0,007	< 0,01	< 0,006	28,7	0,44	5,19	159	< 2,5	0,18					-1,92	2,50			
Milet West	MT-W_G4_MT47	q	3,4	0,69			w		0,670	0,41	0,113	0,517	0,123	0,038	0,229	0,037	0,262	3,54	0,065	0,185	0,023	0,136	0,020	53,0	0,22	6,12	120,9	< 5	0,44					-5,62	1,33			
BG MT W	MT-W_G5_MT48	q	2,4	1,05	0,247	0	w		0,600	0,52	0,103	0,458	0,118	0,035	0,245	0,039	0,292	4,13	0,071	0,219	0,031	0,179	0,029	39,4	0,05	2,50	113,9	< 5	0,35					-7,55	1,39			
BG MT W	MT-W_G6_MT49	q	1,6	0,48	0,24	0	w		0,045	0,06	0,006	0,030	0,005	0,001	0,007	0,001	0,007	0,058	0,001	0,004	0,001	0,003	0,001	18,6	0,26	2,50	119,7	< 5	0,16					-2,72	2,44			
BG MT W	MT-W_G4_MT47_2	q	3,4	0,69			wg	N8	0,687	0,40	0,105	0,497	0,131	0,033	0,212	0,037	0,273	3,72	0,065	0,197	0,023	0,145	0,020	40,2	0,15	3,56	127	< 2,5	0,32						-2,80	1,85		
BG MT W	MT-W_G-MT22Dol	q	0,6	0,28			w	N8+ N6																												-1,23	2,18	
BG MT W	MT-W_G-MT23dol	q					w	N9- N8																													-1,23	2,18
BG MT W	MT-W_MT_West	q	2,2	0,87			w	N9	0,07	0,12	0,013	0,050	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	0,008	0,10	< 0,006	0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	21,0	0,04	3,73	52,6	< 2,5	0,40						-3,41	2,20		
BG MT W	MT-W_MW 2/2	q	2,6	0,79			w		0,063	0,09	0,009	0,049	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	0,007	0,14	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	47,2	0,41	8,20	49,3	< 2,5	0,96						-2,84	1,66		
BG MT W	MT-W_MW 2Cc_134	q	2,6	0,79	0,227	0	w	N 8.5	0,111	0,11	0,020	0,091	< 0,03	< 0,01	0,021	< 0,007	< 0,02	0,181	< 0,007	< 0,02	< 0,007	< 0,01	< 0,005	31,6	0,17	6,84	67,2	< 2,5	0,47						-2,77	1,38		
BG MT W	MT-W_MW 3/2	q	2,6	0,79	0,41	0,02126	w		0,226	0,26	0,058	0,300	0,071	0,019	0,084	0,011	0,086	0,83	0,019	0,047	< 0,004	0,034	< 0,005	72,0	0,04	7,25	109	< 2,5	0,66						-4,20	1,67		
BG MT W	MT-W_MW 3_135	q	3,6	0,83	0,331	0	w	N9	0,394	0,49	0,091	0,472	0,110	0,029	0,119	0,017	0,104	1,02	0,021	0,060	0,007	0,046	< 0,005	107	0,07	15,9	135	< 2,5	0,79							-4,14	1,35	
BG MT W	MT-W_MW11imst_133	q	1	0,43			k	N7																												-7,12	-6,57	
BG MT W	MT-W_Schneck_MT_20	q					wg	N8- N7	0,786	1,34	0,148	0,534	0,098	0,022	0,099	0,013	0,087	0,73	0,020	0,063	0,007	0,060	0,008	62,5	5,93	17,81	134	2,96	0,47							-3,20	2,01	
BG MT W	MT-W_Schneck_MT_21	q	1,2	0,8			w	N8,5																													-2,50	2,24
BG MT W	MT-W_Schneck_MT_23	q					w	N9- N8	0,06	0,09	0,010	0,044	< 0,02	< 0,007	< 0,02	<																						

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC	
BG NW	BurgAd28-1Ccwgr_124	q	2,4	0,8	0,078	0,17959	w	N8-N7	0,490	0,36	0,102	0,404	0,088	0,019	0,081	0,010	0,066	0,460	0,014	0,039	< 0,007	0,028	< 0,005	243	0,42	42,0	121	< 2,5	2,02	-4,44	2,07	
BG NW	BurgAd28-1Ccwgr_125	q	3,4	0,67	0,154	0	w	N8	0,094	0,10	0,013	0,065	< 0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,007	< 0,02	0,144	< 0,007	< 0,02	< 0,007	< 0,01	< 0,005	23,6	0,15	4,61	261	3,87	0,09	-5,42	0,08	
BG NW	BurgAd29Ccgr_125b	q	1,8	0,71	0,162	0	gr	N5- N4																								
Brasilien	Bra PV	q					w	N8-N7	0,175	0,23	0,031	0,159	0,030	< 0,01	0,034	< 0,006	0,034	0,473	< 0,007	0,029	< 0,007	< 0,01	< 0,008	22,2	11,01	2,50	7,80	10,3	2,85			
Carrara	Car 2	q	1	0,24	0,403	0	w	N9, N8, N7, N5 & 10YR 8/6	0,134	0,08	< 0,01	0,048	< 0,02	0,009	0,015	< 0,005	0,011	0,29	< 0,004	0,014	< 0,005	0,012	< 0,005	27,0	0,31	25,50	102	3,44	0,26	-1,47	2,49	
Car	Car 3543	q	0,4	0,25			w		6,394	5,17	1,146	4,580	0,836	0,193	0,949	0,128	0,845	8,32	0,181	0,545	0,068	0,437	0,062	868,1	0,56	118,4	144	105,6	6,03	-0,74	2,25	
Car	Car 4131	q	1	0,32			w																									
Car	Car 4132 B	q	1	0,27			w																									
Car	Carr-AWI-1	q					w		2,408	0,99	0,371	1,482	0,274	0,065	0,341	0,048	0,332	3,38	0,075	0,226	0,030	0,172	0,025	176	0,41	37,2	151	3,18	1,17			
Car	Carr-AWI-2	q					w		2,349	0,98	0,351	1,515	0,284	0,071	0,358	0,048	0,335	3,34	0,065	0,207	0,025	0,174	0,025	172	0,40	37,1	146	5,07	1,17			
Car	Carr-AWI-3	q					w		2,341	0,99	0,343	1,457	0,288	0,064	0,344	0,043	0,322	3,51	0,070	0,202	0,026	0,173	0,026	191	0,41	38,0	146	3,01	1,31			
Car	Carr-AWI-4	q					w		2,306	0,94	0,353	1,451	0,267	0,063	0,358	0,048	0,318	3,40	0,071	0,215	0,026	0,180	0,023	164,1	0,42	35,92	134	5,36	1,22			
Car	Carr-AWI-5	q					w		2,257	0,92	0,338	1,376	0,249	0,062	0,330	0,046	0,308	3,51	0,067	0,203	0,028	0,172	0,025	181,5	0,42	36,31	135	4,09	1,34			
Car	Carr-AWI-6	q					w																	169,8	0,43	36,97	137	3,38	1,24			
Car	Carr-AWI-7	q					w																	162,4	0,42	36,46	137	2,70	1,19			
Car	Carr-AWI-8	q					w																	164,4	0,42	36,24	137	8,46	1,20			
Delion	Del 1	q					w		1,853	0,46	0,211	0,915	0,161	0,038	0,243	0,035	0,267	3,93	0,063	0,191	0,023	0,149	0,020	80,9	0,57	18,01	145	3,53	0,56	-6,95	2,76	
Del	Del 17,II,2	q					w		0,747	0,46	0,169	0,721	0,165	0,037	0,203	0,033	0,247	2,31	0,050	0,162	0,023	0,144	0,020	24,8	0,21	3,91	116	< 2,5	0,21	-1,45	2,05	
Del	Del 2	q	5	1,11			w		1,89	0,47	0,211	0,913	0,161	0,041	0,257	0,033	0,255	4,03	0,061	0,201	0,024	0,145	0,022	26,0	0,24	4,29	118	< 2,5	0,22	-1,50	2,11	
Didyma archaische Columna Caelata Dy aCc	DidArColC_AS 202.4	a	2	0,91	0,36	0	w																									
Dy aCc	DidArColC_AS 202.4_2	a	2	0,83	0,36	0	w		3,34	1,37	0,525	2,35	0,567	0,165	1,09	0,172	1,15	11,1	0,246	0,676	0,075	0,431	0,054	44,5	0,11	4,39	117	< 2,5	0,38	-5,62	1,68	
Dy aCc	DidArColC_AS 202.4_3	a			0,36	0	w																									
Dy aKap arch. Kapitell	DidArkap_68/4	a	1,6	0,6			w		0,063	0,10	0,009	0,047	< 0,02	< 0,008	0,017	< 0,008	< 0,02	0,147	< 0,007	< 0,01	< 0,007	< 0,01	< 0,006	19,6	0,24	6,19	60,9	< 2,5	0,32	-3,07	1,34	
Dy aKap	DidArkap_ArchDi1_68	a	1,4	0,54			w		0,050	0,08	0,009	0,044	0,01	0,00	0,013	0,00	0,012	0,133	0,00	0,008	0,00	0,01	0,00	13,0	0,18	5,41	45,0	< 5	0,29			
Dy Dok Dodekastyl los	DidDodek_thas_Dy 5	a	5,4	1,67	0,35	0	w		0,548	0,13	0,070	0,326	0,059	0,014	0,085	0,011	0,086	1,340	0,023	0,073	0,010	0,070	0,010	19,3	0,19	40,20	74,4	3,99	0,26	-0,61	3,12	
Dy Kouros	DidArK_AS2.04	a					w																									
Dy Kouros	DidArK_AS2.04_2	a	4	20,246	2,25474		w		1,34	0,74	0,221	1,05	0,241	0,070	0,460	0,075	0,492	5,14	0,112	0,310	0,039	0,223	0,029	107	0,36	9,84	123	< 2,5	0,87	-7,24	0,68	
Dy Kouros	DidArK_AS2.04_3	a					w																									
DyNaikos	DidNaikAS212/2	a	2	1,11			w																									
Dy Nais	DidNaikAS212_1	a	2	10,232	0		w		0,061	0,06	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,05	< 0,01	< 0,07	0,053	< 0,01	< 0,04	< 0,01	< 0,06	< 0,01	16,2	0,09	3,70	54,4	< 2,5	0,30	-3,71	1,73	
Dy Nais	DidNaikAS212_2	a		0,658	0		w																									
Dy Nais	DidNaikDy 12	a		0,318	0,01133		w	N9	0,032	0,05	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,007	< 0,01	< 0,005	< 0,009	0,07	< 0,004	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,005	15,0	0,09	5,78	44,5	< 2,5	0,34	-3,65	1,83	
Dy Stein- garten	DidSteing_Dy2	a	1,2	0,57			w		0,071	0,10	< 0,01	0,042	< 0,02	< 0,007	< 0,01	< 0,005	< 0,009	0,078	< 0,004	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,005	34,8	0,45	6,80	130	< 2,5	0,27	-2,23	2,16	
Ephesos Hafen- therme	Ef-HT_Ef1	a	2,4	0,74	0,332	0,79119	w		0,283	0,45	0,058	0,232	0,047	0,011	0,052	0,007	0,052	0,43	0,011	0,036	0,004	0,032	0,004	91,1	0,72	2,50	224,8	< 5	0,41	-2,49	2,59	
Ef Ht	Ef-HT_Ef1_2	a	2,4	0,57	0,282	0,47221	w																									
Ef Ht	Ef-HT_Ef3	a	2	0,69	0,367	0,24639	w	N 8.5	0,49	0,69	0,086	0,28	0,050	0,008	0,049	0,006	0,052	0,43	0,010	0,034	< 0,005	0,031	< 0,005	89,5	0,69	2,50	220	4,58	0,41	-2,13	2,49	
Ephesos	Ef_7s_22limestone	q			0,661	0	k	N5-N4-N3- N2	0,576	1,10	0,133	0,510	0,093	0,021	0,085	0,013	0,081	0,458	0,014	0,050	0,006	0,040	0,006									
Eph	Ef_Bel-Ay-d	q	2	0,61	0,404	0	w		2,50	1,21	0,455	1,96	0,415	0,107	0,595	0,095	0,647	6,43	0,143	0,469	0,060	0,353	0,049	22,2	0,14	3,01	95,5	< 2,5	0,23	-5,39	4,32	
Eph	Ef_Bel-Ay-h	q	2	0,83	0,251	20,166	w	N8- N7	2,83	2,99	0,632	2,81	0,628	0,137	0,713	0,106	0,682	5,49	0,142	0,423	0,055	0,289	0,038	946	4,21	192	186	9,13	5,07	-8,23	2,80	
Eph	Ef_Kur25Ccdol	q	3,8	20,153	3,66592		w	N9-N8	2,25	1,44	0,357	1,43	0,292	0,069	0,403	0,057	0,383	4,22	0,082	0,248	0,032	0,203	0,029	70,5	0,74	16,0	57,6	< 5	1,22			

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC
GF	GF_86,1,5b	a					w		0,66	0,26	0,120	0,528	0,123	0,030	0,164	0,023	0,176	2,10	0,038	0,126	0,013	0,098	0,014	40,9	0,31	5,10	165,87	4,99	0,25	-0,51	2,81
GF	GF_86/1/	a					w																								
GF	GF_86/1/4 r	a					w																								
GF	GF_86/1/5 a	a					w																								
GF	GF_86/1/5 b	a					w																								
GF	GF_88,1	a					w		0,580	0,25	0,103	0,497	0,106	0,026	0,155	0,027	0,191	2,32	0,042	0,141	0,018	0,135	0,017	24,9	0,42	6,15	207,64	10,9	0,12	-0,30	2,91
GF	GF_88,1_2	a			0,32	0,09455	w																								
GF	GF_88,28	a			0,308	0,04826	w		0,150	0,13	0,021	0,111	0,022	< 0,007	0,036	< 0,005	0,041	0,694	0,011	0,038	< 0,005	0,035	< 0,005	17,0	0,37	5,98	200,98	4,63	0,08	-0,29	2,90
GF	GF_88/1	a					w																								
GF	GF_88/28	a					w																								
GF	GF_90	a					w		0,231	0,10	0,030	0,157	0,029	< 0,007	0,049	0,006	0,051	0,724	0,013	0,042	< 0,005	0,039	0,005	13,4	0,32	5,57	217,21	3,70	0,06	-4,09	2,72
GF	GF_90	a					w																								
GF	GF_90_2	a					w																								
GF	GF_92/6	a	2,8	0,51			w		0,44	0,26	0,072	0,33	0,069	0,015	0,094	0,014	0,111	1,72	0,026	0,089	0,011	0,082	0,011	19,3	0,29	6,34	194,63	< 2,5	0,10		
GF	GF_92_30	a	2	0,59	0,191	0	w	N 8.5	0,488	0,29	0,083	0,361	0,074	0,019	0,112	0,017	0,120	1,83	0,031	0,099	0,013	0,080	0,012	19,3	0,32	8,15	182,68	< 5	0,11	-10,92	2,75
GF	GF_93_31	a	3	0,77	0,369	0	w	N 8.5	0,400	0,16	0,073	0,338	0,072	0,018	0,096	0,015	0,102	1,28	0,026	0,079	0,011	0,073	0,010	23,9	0,37	6,57	217,04	< 5	0,11	-4,46	2,75
GF	GF_97,1	a	2,4	0,59			w		0,611	0,33	0,113	0,505	0,117	0,025	0,174	0,024	0,182	2,292	0,043	0,139	0,018	0,124	0,017	34,8	0,40	7,06	231,33	7,03	0,15	-3,18	2,80
GF	GF_97,2	a	2,6	0,74			w																								
GF	GF_97/1	a					w																								
GF	GF_97/2	a					w																								
GF-E	GF_106/E	a	3	0,67			w		0,732	0,46	0,106	0,474	0,079	0,020	0,149	0,019	0,163	2,48	0,041	0,117	0,016	0,095	0,013	14,8	0,29	5,33	125,58	< 2,5	0,12	-0,37	2,84
GF-E	GF_109E	a	0,5	0,2			w		0,761	0,93	0,156	0,631	0,132	0,029	0,157	0,022	0,175	1,89	0,038	0,130	0,018	0,113	0,016	570,7	1,93	79,98	90,45	8,21	6,31	-1,55	1,94
GF-E	GF_111/E	a	3	0,91			w	N7- N6	1,257	1,72	0,250	0,997	0,192	0,043	0,202	0,031	0,195	1,78	0,042	0,124	0,015	0,095	0,015	545,7	0,25	18,64	182,09	< 2,5	3,00	-3,35	2,32
Hymettos	Hym16	q	0,8	0,23	0,356	0	wg	N7.5 + N8	1,415	0,28	0,108	0,496	0,075	0,018	0,131	0,019	0,140	2,740	0,036	0,124	0,017	0,105	0,015	24,8	0,17	7,32	93,7	< 2,5	0,26	-5,65	2,50
Hym	Hym17	q	0,4	0,20	0,258	0	wg	N6 + N7	1,299	0,41	0,138	0,571	0,103	0,029	0,171	0,023	0,169	2,855	0,042	0,140	0,018	0,121	0,019	62,2	0,24	4,97	132	3,73	0,47	-2,43	1,89
Kae gr Pergamonalta	KaeGr1_1	a	0,8	0,44			gr																								
Kae gr	KaeGr1_2	a	0,8	0,44			gr																								
Kae gr	KaeGr2	a	0,8	0,44			gr																								
Kos	KosARM 44	a	1,8	0,77			w	N8-N7+N5+N9	1,120	0,61	0,171	0,725	0,150	0,032	0,208	0,032	0,188	2,49	0,045	0,122	0,017	0,109	0,016	706,4	0,49	159,3	226	4,83	3,13	-10,16	5,10
Lasa	Lasa3_1	q	1,4	0,42	0,752	0	w																								
Lasa	Lasa3_2	q	1,4	0,42	1,6	0	w		0,351	0,43	0,073	0,333	0,076	0,023	0,098	< 0,02	0,082	0,788	0,014	0,044	< 0,02	0,033	< 0,01	994,9	0,21	42,22	313	< 2,5	3,18	-10,67	1,20
London (Penteli)	Lon1	a		0,154	0,10632	w		0,676	0,81	0,130	0,541	0,113	0,025	0,133	0,021	0,143	1,53	0,032	0,100	0,013	0,086	0,011									
London	Lon2	a	1,8	0,49	0,154	0,10632	w		0,590	0,71	0,114	0,450	0,105	0,022	0,112	0,018	0,116	1,36	0,026	0,077	< 0,02	0,064	< 0,01	263,6	0,24	44,38	131	2,64	2,01	-4,70	2,58
London	Lon2.2	a				w																									
London	Lon2/2	a				w																									
London	Lon3	a		0,394	0,00914	w																									
Mani	Mani21_9_dkl	q				gw																									
Mugla	Muglabeymod_14_150a	q	4,6	1,18			w	N9	0,077	0,09	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,05	< 0,01	< 0,07	0,335	< 0,01	< 0,04	< 0,01	< 0,06	< 0,01	10,3	0,02	2,50	56,9	< 2,5	0,18	-4,08	1,67
Mend-E	MuglaBeymod_151	q	4,2	0,83			w	N8- N7	0,053	0,08	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,05	< 0,01	< 0,07	0,242	< 0,01	< 0,04	< 0,01	< 0,06	< 0,01	12,6	0,04	2,50	52,5	< 2,5	0,24	-3,92	1,59
Mend-E	MuglaSar_12a_148	q		0,32	0,52929	w			0,273	0,32	0,077	0,366	< 0,1	< 0,02	0,084	< 0,01	< 0,07	0,650	0,014	< 0,04	< 0,01	< 0,06	< 0,01	161	0,21	6,95	93,7	< 2,5	1,72	-3,33	1,17
Magnesia	Mg_LsMagDorf2	q	2,8	1,43			w	N8.6	0,244	0,45	0,047	0,165	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03	0,17	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,01	6,1	0,30	4,67	230	< 2,5	0,03	-4,26	3,14
Mg	MgLS1P_1	q	1,6	0,61	0,217	10,8699	w		1,244	0,75	0,197	0,861	0,188	0,040	0,277	0,037	0,253	3,20	0,050	0,166	0,019	0,134	0,018	91,5	1,90	12,87	77,6	2,99	1,18	-8,65	3,87
Mg	MgLS1p_2	q				w	N8- N7 + N9																								
Mg	MgLS1S_1	q	1,4	0,53	0,224	7,49144	w	N8	1,198	0,77	0,205	0,886	0,193	0,044	0,272	0,038	0,269	3,41	0,058	0,178	0,019	0,123	0,017	120,4	2,49	18,75	72,2	3,30	1,67	-8,49	3,88
Mg	MgLS1s_2	q				w	N9- N8																								
Mg ArtAl Altar	Mg_MagArtAlt1.3-249_63	a	3	0,83	0,284	0	w	5Y yellowgrey	0,042	0,10	0,011	0,048	< 0,02	< 0,008	< 0,02	< 0,008	< 0,02	0,062	< 0,007	< 0,01	< 0,007	< 0,01	< 0,006	33,8	0,13	14,8	111	< 2,5	0,31	-3,06	2,41
Mg ArtAl	Mg_MagArtAlt1.3-249_63b	a	3	0,83	0,284	0	w		0,047	0,08	0,010	0,041	0,01	0,00	0,01	0,00	0,007	0,067	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00								
Mg ArtK Kapitell	Mg_MagArtKa1.3-81_60	a	1	0,42	0,357	2,10005	w		1,24	0,89	0,223	0,951	0,206	0,047	0,278	0,039	0,272	3,09	0,060	0,182	0,023	0,136	0,021	162	2,22	19,8	86,8	4,29	1,87	-5,26	4,02
Mg ArtK	Mg_MagArtKap1.3-81_60b	a	1	0,42	0,357	2,10005	w		1,34	0,95	0,236	1,01	0,217	0,052	0,298	0,043	0,290	3,53	0,065	0,196	0,025	0,149	0,023								

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC		
Mg ArtK	Mg_MagArtKap1.3-81_60c	a	1	0,42	0,354	1,83212	w																								-5,43	4,09	
Mg ArtSima	Mg AT Si 2d	a			0,325	17,5425	w																								-4,64	4,54	
Mg ArtSi	Mg AT Si 2h	a			0,608	1,83586	w	N9	0,944	0,32	0,128	0,577	0,111	< 0,02	0,202	0,028	0,185	2,56	0,039	0,135	0,017	0,118	0,019	16,3	0,19	3,88	151	< 2,5	0,11	-4,62	4,53		
Mg ArtSi	Mg AT Si 2h	a					w																								-4,59	4,55	
Mg ArtSi	Mg AT2ha	a					w																								-4,65	4,38	
Mg ArtSi	Mg ATSi2ha	a					w																								-4,49	4,41	
Mg ArtSi	Mg_MagArtSi1.3-13_61	a	2,4	0,83	0,239	11,4757	w		0,607	0,26	0,107	0,498	0,116	0,030	0,190	0,026	0,198	2,70	0,046	0,150	0,018	0,104	0,016	109	3,68	30,5	111	5,48	0,98				
Mg ArtSi	Mg_MagArtSi1.3-13_61b	a	2,4	0,83			w	N7.5	0,602	0,26	0,110	0,521	0,131	0,030	0,184	0,029	0,190	2,68	0,046	0,137	0,018	0,111	0,018	109	3,68	30,5	111	5,48	0,98	-4,56	4,74		
Mg ArtSi	MgAT Si1	a					w																								-4,58	4,49	
Mg ArtSi	MgAT Si2ha	a					w																								-4,50	4,44	
Mg ArtSi	MgAT1d	a			0,262	3,1943	w																								-4,52	4,51	
Mg ArtSi	MgAT1h	a					w																								-4,62	4,52	
Mg ArtSi	MgAT2h	a			0,264	2,40722	w																										
Mg ArtSi	MgAT3	a	2,2	0,40	0,329	3,80955	w																									-4,34	4,69
Mg ArtSi	MgATGFSi2d	a			0,321	4,89992	w		1,01	0,49	0,177	0,809	0,192	0,050	0,280	0,039	0,277	3,23	0,061	0,187	0,027	0,144	0,022	202	3,60	39,0	71,2	8,25	2,84	-4,61	4,53		
Mg ArtSi	MgATSi	a					w																										
Mg ArtSi	MgATSi2d	a					w																									-4,58	4,42
Mg ArtSi	MgATSi2d	a		0,225	25,0002	w																											
Mg ArtSi	MgATSi2h	a					w																										
Mg ArtSi	MgATSi2ha	a					w	N8	1,52	0,68	0,277	1,29	0,300	0,074	0,405	0,056	0,378	4,25	0,091	0,264	0,032	0,186	0,026	34,1	0,69	11,4	82,3	2,81	0,41	-4,25	4,67		
Milas	Milas_gebfc_P 8_106_b	q					wg	N7- N6-N5																							-2,33	2,31	
Milas	Milas_G-Mi1_1	q					w	N9																								-5,04	0,45
Milas	Milas_G-Mi1_2	q					w	N9																								-3,73	1,17
Milas	Milas_G-Mi1_3	q	1	0,37			w	N9	0,099	0,15	0,012	0,061	0,010	< 0,01	< 0,04	< 0,006	< 0,02	0,169	< 0,007	0,012	< 0,007	< 0,01	< 0,008	110,3	0,10	9,94	35,1	< 2,5	3,14	-5,52	0,11		
Milas	Milas_w_P9_107_b	q	6	1,43			w	N9-N8- N7																								-3,63	3,13
Milas	Milasbord_P11_109	q					rot	5R 2/6+ 5R3/4																								-2,65	2,70
Milas	Milasbord_P12_110	q	1	0,22			rot	10R 3/4+ 5R 3/4- N9-4																								-2,73	2,53
Milas	Milas_gebfc_P 8_106_a	q	1	0,26			wg	N8+N7	0,151	0,19	0,022	0,081	< 0,02	< 0,008	0,019	< 0,008	0,020	0,216	< 0,007	0,011	< 0,007	< 0,01	< 0,006	75,4	0,34	3,64	144	< 2,5	0,52	-2,33	2,32		
Milas	Milasw_P10_108	q	2,4	0,45			w	N9+ 5Y 8/1-10YR 6/6+ 10YR 8/6	0,307	0,40	0,066	0,299	0,055	0,015	0,096	0,011	0,087	1,27	0,018	0,056	< 0,007	0,042	< 0,006	338	0,08	11,9	42,2	3,64	8,00	-3,83	1,10		
Milas	Milas_w_P9_107	q			0,249	0,02717	w	N9	1,05	1,74	0,225	0,956	0,204	0,046	0,233	0,033	0,223	1,75	0,043	0,141	0,017	0,113	0,018	478	0,23	18,8	84,0	2,88	5,69	-4,35	2,81		
Marmara	Mm_CRem1d2	q	1,2		0,243	0,4296	wg																										
Mm	Mm_CRem1d3	q			0,248	0,3247	wg																										
Mm	Mm_CRem1h2	q			0,395	0,0000	w																										
Mm	Mm_DC_Aks dk	q					g	N7-N6-N5																								-4,13	1,19
Mm	Mm_DC_Aks_h	q	2,6	0,65			wg	N7.5	0,15	0,04	0,021	0,100	< 0,03	< 0,02	0,044	< 0,02	0,049	0,66	< 0,02	0,041	< 0,02	0,035	< 0,01	51,0	0,43	2,50	170	11,2	0,30	-1,55	3,14		
Mm	Mm_DC5,6hq	q	3	0,63	0,329	0,0000	w	N9	0,166	0,15	0,028	0,120	< 0,03	< 0,02	0,036	< 0,02	0,038	0,74	< 0,02	0,038	< 0,02	0,034	< 0,01	10,0	0,24	4,65	113	< 2,5	0,09	-8,51	2,45		
Mm	Mm_DC-5h	q					w	N9																									
Mm	Mm_DC7	q	2,8	0,74	0,257	0,3134	w		1,126	0,60	0,196	0,823	0,184	0,041	0,245	0,034	0,236	3,007	0,054	0,170	0,022	0,142	0,023	30,6	0,51	8,21	162	4,74	0,19	-0,52	2,45		
Mm	Mm_DC-7d	q					wg	N7.5																									
Mm	Mm_DCg6-2	q					w	N7- N6																								-9,13	2,28
Mm	Mm_DCg6Ccdol	q			0,287	4,0216	w		0,185	0,17	0,030	0,140	0,028	0,007	0,039	0,006	0,044	0,697	0,011	0,036	0,005	0,036	0,005	34,8	1,11	6,73	130,7	< 5	0,27	-12,96	0,61		
Mm	Mm_DCgw7C	q			0,166	0,7568	w	N7-N8	1,036	0,60	0,187	0,860	0,158	0,041	0,231	0,034	0,233	2,86	0,056	0,168	0,022	0,137	0,019	35,8	0,61	10,1	171,1	< 5	0,21	-1,01	2,31		
Mm	Mm_DCw5Cc	q			0,184	0,0000	w		0,167	0,16	0,029	0,124	0,028	0,007	0,040	0,007	0,044	0,718	0,012	0,040	0,005	0,037	0,005	25,1	0,25	5,44	114,5	< 5	0,22	-8,68	2,31		
Mm	Mm_Dinc_Cc 1	q	2,2	0,71	0,255	0,0394	w	N8-N7	0,067	0,08	< 0,02	< 0,07	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03	0,151	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,01	32,8	0,30	2,50	153	< 2,5	0,21	-2,09	3,79		
Mm	Mm_Dinc_Cc 2	q			0,308	0,0275	w		0,08	0,09	< 0,02	< 0,07	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03	0,28	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,01	25,8	0,36	2,50	133	< 2,5	0,19	-2,01	3,76		
Mm	Mm_Dincdo	q	0,2	0,2			w	N9																									
Mm	Mm_Dol_2_Colak	q					w		0,047	0,06	< 0,02	< 0,07	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03	0,025	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,01	20,3	11,51	2,50	59,5	3,07	0,34	-6,18	1,97		
Mm	MM_DolAks1	q	0,8	0,27	0,029	96,3069	w	N9	0,0374	0,06	0,0056	0,0359	0,0051	0,0009	0,0065	0,0004	0,0055	0,062	0,0007	0,0042	< 0,001	0,0038											

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC		
							N6+N9																										
Mm	Mm_K0	q			0,397	0,0000	w	N8.5	0,025	0,02	< 0,006	< 0,02	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	< 0,006	0,081	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	15,0	0,40	2,50	132	< 2,5	0,11	-2,56	2,90		
Mm	MM_KA1	q	2	0,8			wg	N7 N4+ N9																									
Mm	Mm_KA11Cc	q			0,21	0,1199	w	N8.8	0,069	0,09	0,013	0,060	0,013	0,003	0,013	0,001	0,014	0,147	0,003	0,008	0,002	0,008	0,002	16,9	0,29	2,50	141,7	< 5	0,12	-2,12	3,08		
Mm	Mm_KA12bCc	q					w	N8																									
Mm	Mm_KA12Cc	q			0,185	0,1227	w	N8	0,067	0,11	0,014	0,051	0,011	0,002	0,014	0,002	0,014	0,157	0,003	0,009	0,002	0,009	0,001	35,3	0,33	2,50	140,7	< 5	0,25	-2,19	3,47		
Mm	Mm_KA13	q					wgr	N7	0,916	1,68	0,188	0,661	0,118	0,022	0,102	0,016	0,095	0,657	0,020	0,059	0,008	0,060	0,009										
Mm	MM_KAP1dkCcDol	q			0,168	33,9015	w	N5	0,552	1,13	0,136	0,531	0,107	0,023	0,100	0,013	0,085	0,625	0,017	0,050	0,007	0,048	0,006										
Mm	MM_KöyP1	q			0,221	0,0000	w		0,049	0,05	0,007	0,037	0,007	< 0,008	0,010	0,000	0,010	0,142	0,002	0,008	0,001	0,007	0,001										
Mm	Mm_Man3Lamp1 Lamporphyr	q	0,8	0,27			dk		0,514	1,26	0,177	0,852	0,259	0,103	0,382	0,070	0,496	2,84	0,111	0,354	0,0530	0,374	0,060										
Mm	Mm_Man3Lamp2	q					dk	N2-N3																									
Mm	Mm_Man3Lamp3	q					dk																										
Mm	Mm_Mand Gg	q					dk																										
Mm	Mm_ManFa6	q					w	N7-N6	0,08	0,06	0,010	0,046	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	0,010	0,15	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	31,4	0,60	2,50	219	2,71	0,14	-1,91	2,49		
Mm	Mm_ManFa7	q			0,312	0,0000	w	N8-N7	0,086	0,14	0,014	0,059	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	0,011	0,07	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	29,9	0,42	2,50	281	< 2,5	0,11	-1,95	2,17		
Mm	Mm_ManP4h	q			0,286	0,7356	w		0,073	0,08	0,012	0,052	0,010	0,001	0,013	0,001	0,011	0,142	0,002	0,008	0,001	0,008	0,001	38,5	0,73	2,50	226,0	< 5	0,17				
Mm	Mm_ManP5dk	q			0,181	0,3195	w	N4	0,544	1,11	0,136	0,507	0,095	0,019	0,090	0,011	0,071	0,406	0,014	0,040	0,005	0,036	0,004										
Mm	Mm_Me1Cc	q	2,6	0,91	0,385	0,0000	w	N8-N7- N6+N9	0,036	0,04	0,01	0,021	0,00	0,00	0,01	0,00	0,008	0,084	0,002	0,01	0,00	0,01	0,00	19,6	0,28	2,50	136,7	< 5	0,14	-4,84	3,26		
Mm	Mm_Me2Cc	q			0,207	0,6086	w	N9	0,112	0,05	0,019	0,090	0,021	0,005	0,028	0,005	0,040	0,474	0,010	0,029	0,004	0,027	0,004	17,3	0,50	2,50	257,9	< 5	0,07	-1,85	2,87		
Mm	Mm_Me2Kar (Karst)	q			0,169	0,0000	k	10R 5/4	0,139	0,194	0,031	0,129	0,030	0,007	0,033	0,005	0,032	0,342	0,007	0,021	0,003	0,020	0,003										
Mm	Mm_rem_1h	q	2,2	0,77	0,32	0,0000	w		0,098	0,06	0,006	0,037	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	0,013	0,243	< 0,006	0,010	< 0,004	< 0,009	< 0,005	32,3	0,21	2,50	120	< 2,5	0,27	-1,96	3,49		
Mm	Mm_rem1d	q	1,2	0,33	0,12	57,9078	wg		0,308	0,39	0,044	0,172	0,031	< 0,007	0,028	< 0,005	0,030	0,44	< 0,006	0,025	< 0,004	0,020	< 0,005	164,1	5,46	3,60	91,2	3,09	1,80	-1,94	3,52		
Mm	Mm_SaDe_h	q			0,249	0,3241	wg	N7,5	0,03	0,04	< 0,006	0,021	< 0,02	< 0,007	< 0,02	< 0,005	< 0,006	0,08	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	16,0	0,61	2,50	149	6,69	0,11	-1,50	3,02		
Mm	Mm_SaDe_d	q			0,183	0,0519	w	N9	0,081	0,11	0,012	0,051	< 0,02	< 0,007	0,016	< 0,005	0,012	0,145	< 0,006	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,005	70,4	0,56	2,50	146	4,96	0,48	-1,42	2,97		
Mm	Mm_SalP1	q			0,198	0,3426	w		0,070	0,09	0,013	0,049	0,007	0,002	0,008	0,001	0,009	0,091	0,002	0,007	0,001	0,006	0,001	72,5	0,33255	4,00	161		0,45	-1,62	2,90		
Mm	Mm_Sar_h1	q			0,361	0,0000	w	N8,5	0,55	0,39	0,087	0,377	0,068	0,018	0,110	0,016	0,127	1,79	0,027	0,091	0,011	0,078	0,010	12,0	0,29	9,26	115	< 2,5	0,10	-0,88	2,44		
Mm	Mm_Sar_h2	q					w																										
Mm	Mm_SarO4	q	3,2	0,63	0,258	0,0000	w	N9	0,053	0,03	0,008	0,037	0,007	0,002	0,009	0,001	0,011	0,187	0,003	0,011	0,001	0,010	0,001	10,5	0,32	2,50	128,3	< 5	0,08	-1,74	3,50		
Mm	Mm_Silfa8Cc	q	2,4	0,87	0,278	0,0314	w	N8.5	0,343	0,33	0,068	0,271	0,055	0,014	0,079	0,012	0,093	1,31	0,022	0,074	0,011	0,065	0,009	23,3	0,28	6,85	115,8	< 5	0,20	-1,53	2,70		
Mm	Mm_Silfa9gwCc	q	2,8	0,57	0,199	0,0326	w	N8	0,824	0,38	0,156	0,660	0,156	0,036	0,209	0,032	0,224	2,86	0,054	0,171	0,023	0,150	0,023										
Mm	Mm_Silfa-Schief_P1	q	2	0,69			dk		0,418	1,04	0,169	0,923	0,302	0,095	0,387	0,059	0,399	2,23	0,083	0,254	0,039	0,261	0,041										
Mm	Mm_Silfa-Schief_P2	q					dk																										
Mm	Mm_Silfa-Schief_P2-2	q					dk		1,17	3,47	0,309	1,26	0,290	0,072	0,340	0,052	0,324	1,73	0,060	0,161	0,020	0,126	0,020										
Mm	Mm_Silfa-Schief_P2-3	q					dk	N3-N2																									
Mm	Mm_Silfa-Schief_P3-1	q					dk	N3-N2	9,8	26,5	2,36	9,26	1,88	0,405	1,77	0,248	1,27	5,46	0,208	0,518	0,068	0,460	0,076										
Mm	Mm_Silfa-Schief_P3-2	q					dk																										
Mm	MmAksKar	q			0,269	0,0000	k	10Yr 8/6- 10YR 7/4	1,901	0,447	0,355	1,284	0,195	0,042	0,173	0,023	0,120	1,19	0,025	0,071	0,008	0,049	0,008										
Mm	MmAksKar	q					k																										
Mm	MMAksP1	q			0,455	0,5889	w		0,751	1,37	0,177	0,679	0,141	0,028	0,126	0,018	0,119	0,861	0,024	0,071	0,010	0,067	0,009										
Mm	MMAksP2	q			0,226	0,0000	w																										
Mm	Literatur	---							16,8	20																							
MT DeKy Milet Delphinion Kyma	MT_MiDeKy_65	a	1,4	0,54			w		2,73	2,00	0,483	2,08	0,496	0,123	0,637	0,091	0,524	4,54	0,104	0,280	0,033	0,199	0,029	81,2	0,22	11,1	68,8	< 5	1,18	-6,01	2,44		
MT DePl Platte	MT_MiDePl_67	a	1,4	0,59			w		2,06	1,85	0,367	1,58	0,344	0,080	0,421	0,061	0,385	3,54	0,082	0,242	0,032	0,180	0,025	70,7	0,17	5,83	70,4	< 5	1,00	-5,90	1,65		
MT DeVo Volute	MT_MiDeVo_66	a	1,4	0,51			w		2,41	2,05	0,435	1,89	0,408	0,098	0,540	0,083	0,508	4,69	0,107	0,315</													

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC		
MT Mat	MT-Mil-Ma-Mt 33a	a			0,314	0	w		0,099	0,12	0,017	0,062	0,010	0,003	0,017	0,002	0,024	0,494	0,007	0,025	0,003	0,028	0,006	36,7	0,11	5,06	66,9	< 5	0,55	-3,66	1,78		
MT Rank Ranken- pfeller	MT-Rank_AS 202.11a	a					w																								-3,33	2,25	
MT Rank	MT-Rank_AS 202.11a2	a	4,6	10,27	0		w		0,063	0,09	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,05	< 0,01	< 0,07	0,104	< 0,01	< 0,04	< 0,01	< 0,06	< 0,01	17,2	0,03	2,50	61,0	2,57	0,28	-3,35	2,24		
MT Rank	MT-Rank_AS202.11a_1	a					w																								-3,31	2,14	
MT Rank	MT-Rank_AS202.11a_2	a					w																								-3,41	2,12	
MT RH Rathaus Schildakr.	MT_MiRaSch1_62	a	2,8	1,1			w		0,067	0,05	0,009	0,038	0,01	0,00	0,019	0,00	0,023	0,420	0,006	0,018	0,00	0,018	0,00	84,5	0,19	13,8	92,5	< 5	0,91	-3,09	1,77		
MT St	MT-St_Ion_MT36	a	2,2	0,77			w	N7																							-2,29	2,65	
MT St	MT-St_Ort-MT35	a	1,6	0,67			w	N8- N7																							-6,88	0,86	
MT St	MT-St-Boul-MT39	a	1,8	0,91			w	N7- N6- N5																							-2,08	2,80	
Myus	MyLS_28/2	q	2	0,87			w		1,643	1,17	0,359	1,663	0,457	0,133	0,850	0,135	0,903	10,0	0,199	0,564	0,069	0,413	0,064	44,5	0,16	6,97	101	< 2,5	0,44	-6,24	2,41		
My	MyLS_28Cc_123	q	2	0,42	0,121	0	w	N8.9	1,65	1,26	0,380	1,80	0,470	0,141	0,935	0,143	1,01	10,18	0,230	0,651	0,085	0,483	0,066	56,0	0,16	7,47	117	< 2,5	0,48	-6,15	2,17		
My	MyLS_3/2	q	3,4	0,67			w		0,35	0,58	0,080	0,332	0,063	0,011	0,050	< 0,005	0,035	0,30	< 0,006	0,015	< 0,004	< 0,009	< 0,005	11,0	0,21	4,26	195	< 2,5	0,06	-3,04	3,36		
My	MyLS_3_136	q	3,4	0,67			w	N8.8	0,141	0,19	0,024	0,096	< 0,03	< 0,01	0,021	< 0,007	< 0,02	0,157	< 0,007	< 0,02	< 0,007	< 0,01	< 0,005	10,8	0,20	3,84	209	< 2,5	0,05	-3,10	3,18		
My	MyLS_4geb_137b	q					wg	N5-N7+N8																							-3,80	-0,67	
My	MyLS_4gr	q			0,361	0	gr																								-5,46	-0,89	
My	MyLS_4gr_137a	q	3	0,63			wg		0,398	0,38	0,055	0,230	0,039	< 0,01	0,059	< 0,007	0,049	0,622	0,011	0,039	< 0,007	0,026	< 0,005	88,2	0,24	11,0	217	< 2,5	0,41	-4,20	0,96		
My	MymodCcdol30	q	3	0,5	0,892	3,98453	gr	N3-N2 & 10YR 4/2- 10YR 6/6																									
My Gel Gelagerter	My_Gelag_2a	a					w		0,42	0,51	0,081	0,330	0,074	0,015	0,094	0,012	0,097	1,18	0,022	0,074	0,007	0,055	0,006	157,7	0,67	13,80	192	16,0	0,82	-5,03	2,54		
My Gel	My_Gelag_3a	a					w																								-5,07	2,55	
My Gel	My_Gelag_4	a					w																										
My Mtr Mantelträ- ger	My_Mt_2a	a					w		2,025	0,86	0,312	1,437	0,354	0,100	0,665	0,104	0,687	8,24	0,158	0,479	0,057	0,333	0,047	122,8	0,13	9,79	143	4,03	0,86	-7,31	0,94		
My Mtr	My_Mt_3a	a					w																									-7,46	0,93
My Mtr	My_Mt_4	a					w																										
My Wg Wagen- rennen- fries	MyWg_1-2	a	2	0,44	0,251	0	w		1,691	1,10	0,285	1,259	0,341	0,092	0,567	0,088	0,553	6,230	0,119	0,368	0,043	0,274	0,036	58,2	0,16	4,08	107	< 2,5	0,54	-5,89	1,61		
My Wg	MyWg1-2_69	a	3	0,58	0,251	0	w		2,80	1,51	0,485	2,12	0,507	0,127	0,745	0,109	0,718	7,22	0,150	0,439	0,049	0,316	0,044	126	0,22	8,63	138	5,77	0,91	-5,89	1,61		
My Wg	MyWg2-69	a	3,2	1,11			w		2,64	1,42	0,493	2,08	0,488	0,123	0,749	0,113	0,707	7,39	0,155	0,440	0,053	0,317	0,048										
NB Kozak	NB Ak1	a	4,8	0,8			w	N9 - N8	0,429	0,77	0,088	0,313	0,055	0,01	0,061	0,010	0,060	0,505	0,014	0,038	0,006	0,031	0,005	102	0,16	18,7	366		0,28	-12,00	1,80		
NB	NB Ak2	a	5,2	0,77			w																									-12,20	1,50
NB	NB Ak3	a	2,4	1,05			w																									-12,30	2,00
NB	NBEM17Cc	q			0,264	0	w	N8	0,698	0,44	0,124	0,529	0,109	0,031	0,149	0,023	0,143	1,87	0,032	0,094	0,011	0,068	0,009						0,30	-12,99	4,50		
NB	NBEM18Cc	q			0,246	0,36046	w	N8, N6, N5	2,01	1,30	0,374	1,51	0,315	0,071	0,388	0,052	0,341	3,59	0,074	0,211	0,027	0,157	0,021	383,8	0,48	110,8	367,6	< 5	1,04	-13,31	4,49		
NB	NBEM19Cc	q			0,40	0,03598	w	N9+ 5y 8/1	1,69	1,03	0,313	1,32	0,283	0,060	0,365	0,053	0,340	3,89	0,073	0,213	0,027	0,160	0,022						0,42	-13,99	3,72		
NB	NBEM20Cc	q			0,244	0,11972	w	N8	1,80	1,03	0,309	1,29	0,261	0,069	0,348	0,051	0,343	4,12	0,075	0,211	0,026	0,154	0,022	112,8	0,36	26,9	296,3	< 5	0,38	-13,58	4,53		
NB	NBEMVul21 Vulkanit	q					gr	N9, N1, 5Gy 6/1	11,9	22,5	2,95	11,5	2,12	0,441	1,71	0,233	1,26	6,20	0,223	0,590	0,073	0,402	0,050						180,0	7			
NB	NBSelgr1	q			0,226	0,75663	w		0,279	0,46	0,056	0,225	0,046	0,011	0,047	0,007	0,053	0,512	0,010	0,034	0,005	0,029	0,004						0,72				
NB	NBSelgw14	q			0,389	2,50952	w	N8, N7, N6, N5	0,224	0,41	0,046	0,184	0,033	0,011	0,037	0,005	0,031	0,239	0,006	0,021	0,003	0,016	0,003						0,32	-13,74	0,10		
NB	NBSelw15	q					w	N8.5- 5Y 8/1- 10YR 6/2	0,280	0,46	0,059	0,232	0,049	0,012	0,054	0,008	0,055	0,516	0,010	0,034	0,005	0,028	0,004	358,0	0,29	38,7	348,8	< 5	1,03	-11,81	1,39		
NB	NBSelwg16	q					w	N9-N8	2,66	2,44	0,447	1,71	0,329	0,087	0,356	0,051	0,316	3,22	0,067	0,190	0,025	0,155	0,023						0,91	-15,71	3,81		
Nx Naxos	NxPot31_TUM 20	q					w	N9	0,318	0,23	0,051	0,189	< 0,1	< 0,02	0,063	< 0,01	< 0,07	0,863	0,014	0,047	< 0,01	< 0,06	< 0,01	43,2	0,22	9,14	116	3,32	0,37				
Nx	Nx_P21,1	q	6	1,33			w		0,186	0,11	0,025	0,117	< 0,06	< 0,02	< 0,04	< 0,02	0,038	0,60	< 0,01	0,041	< 0,01	< 0,05	< 0,01	64,6	1,16	48,19	153	2,94	0,42	-10,77	2,52		
Nx	Nx-Ap-T25_Nx 215?	a	3	0,87			w																										
Nx	Nx-ApT-26	a	3	1,11			w																									-6,40	0,96
Nx	Nx-ApT-26_2	a	3	1			w																									-5,13	1,66

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC			
Nx	Nx-Kinld_N 21,11	q					w		0,556	0,34	0,097	0,414	0,083	0,019	0,113	0,017	0,115	1,65	0,029	0,092	0,011	0,076	0,011	35,1	0,26	9,21	117	4,84	0,30	-5,62	2,12			
Nx	NxPot-TUM3,N10	q					w		0,306	0,22	0,052	0,238	0,042	< 0,01	0,057	0,008	0,060	0,96	0,013	0,055	< 0,007	0,043	< 0,008	40,9	0,22	7,99	99,4	7,31	0,41					
Nx	NxSangrit_36_TUM	a					w		0,058	0,07	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,05	< 0,01	< 0,07	0,163	< 0,01	< 0,04	< 0,01	< 0,06	< 0,01	23,0	0,13	7,92	129	< 2,5	0,18	-4,18	0,93			
Paros	Par_PS 46,2	q			0,222	0	w																								-2,93	5,20		
ParEMT	Par_Ka TUM23	a					w		2,102	0,70	0,259	1,192	0,214	0,057	0,307	0,043	0,286	4,209	0,069	0,191	0,023	0,131	0,017	61,8	0,24	9,42	100	2,82	0,62	-1,41	1,99			
ParLy	Par_Ly 17	q			0,197	0	w		0,110	0,05	< 0,01	< 0,09	< 0,06	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03	0,14	< 0,01	< 0,03	< 0,01	< 0,05	< 0,01	10,5	0,22	2,50	174	< 2,5	0,06	-3,57	5,42			
ParLy	ParLychn_38TUM	q	2	0,5			w		0,065	0,04	< 0,02	< 0,07	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03	0,11	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,01	10,7	0,17	5,19	212	< 2,5	0,05	-3,99	5,25			
ParPa	Par_Pa16,4	q					w		0,646	1,19	0,120	0,509	0,103	0,022	0,104	< 0,02	0,095	0,69	0,017	0,057	< 0,01	0,050	< 0,01	266,8	0,41	9,98	145	4,69	1,84	-3,63	0,84			
ParPy	Par_Pyt24	a					w		2,48	0,71	0,304	1,298	0,238	0,057	0,344	0,046	0,293	4,27	0,063	0,194	0,024	0,133	0,019	51,9	0,33	13,07	103	< 2,5	0,50	-0,87	2,13			
ParPy	Par_Pyt24TUM	a					w																	60,0	0,50	20,00	80	6,0	0,75	-0,47	2,00			
ParSiph	Par_Siphnos_215	q	1	0,5			w		1,69	1,29	0,352	1,50	0,296	0,068	0,376	0,057	0,371	2,85	0,078	0,230	0,029	0,197	0,026	1197	0,56	61,0	132	5,31	9,07	-2,39	3,59			
ParSiph	Par_Siphnos_216	q					w		2,08	1,21	0,357	1,44	0,300	0,066	0,339	0,051	0,321	3,54	0,077	0,222	0,032	0,205	0,029	467	0,11	28,0	110	2,67	4,24	-3,16	1,69			
Penteli	Pent_h	q	1	0,34			w	N9																179,7	0,49	45,64	227	5,51	0,79		-6,61	2,86		
Pent	Pent_R1	a	1	0,36			w		1,630	2,04	0,262	0,875	0,169	0,04	0,218	0,037	0,239	2,769	0,054	0,184	0,026	0,168	0,024	134	0,33	47,3	182		0,736 26374	-6,30	2,60			
Pent	Pent2_1	q	0,6	0,2			w		1,686	1,12	0,353	1,532	0,345	0,086	0,474	0,082	0,573	5,927	0,125	0,408	0,050	0,354	0,049	276,1	0,60	67,68	148	11,0	1,86	-7,44	2,59			
Pent	Pent2_2	q	2	0,77																														
Pergamon	PgATWFAS211a	a	2,4	1,18			w	N8+ N6, N9,																							-2,68	1,32		
Athenahalle Waffen- relief	PgATWFAS211/2a	a	2,4	0,83			w																									-2,64	1,22	
Pg ATWf	PgATWFAS211/2_2a	a	2,4	0,83			w																									-2,61	1,15	
Pg ATWf	PgATWFAS211d1a	a	2,4	0,83	1,628	0	w		1,74	2,16	0,292	1,18	0,220	0,049	0,240	0,035	0,221	1,65	0,043	0,140	0,019	0,119	0,019	519	0,28	12,3	148	3,14	3,50	-2,46	1,32			
Pg ATWf	PgATWFAS211d2a	a	2,4	0,83			w																									-2,38	1,24	
Pg ATWf	PgATWFAS211h2a	a	2,4	0,83			w																									-2,44	1,13	
Pg ATWf	PgATWFAS211h3a	a	1,8	0,83	0,43	0	w	N 8.5	0,873	0,59	0,081	0,303	< 0,1	< 0,02	0,066	< 0,01	0,070	0,556	< 0,01	0,049	< 0,01	< 0,06	< 0,01	189	0,31	8,59	136	3,02	1,39	-2,42	0,99			
Pg ATWf	PgATWFAS211h4a	a	1,8	0,83			w																									-2,30	0,47	
Pg ATWf	PgATWFAS211va	a	1,8	0,83	0,43	0	w																									-2,56	1,08	
Pg DeT	PgDem1_59	a	2,4	0,94			w		0,674	0,44	0,110	0,474	0,086	0,022	0,118	0,017	0,134	1,75	0,032	0,099	0,013	0,086	0,010											
Deme- tempel	PgDem1_59b	a	2,2	0,53			w		0,641	0,39	0,113	0,476	0,096	0,024	0,123	0,021	0,144	1,95	0,034	0,103	0,015	0,089	0,013	17,4	0,30	8,03	139	4,05	0,12	-1,24	2,84			
Pg DeT	PgDem1_59c	a	2,2	0,53			w																									-1,39	2,70	
Pg DeT	PgDem1_59d	a	2,2	0,53			w																									-0,89	2,87	
Pg DiT	PgDiTAS208,1a	a	2	0,80	0,278	2,55128	w	N 8.5	3,00	3,07	0,565	2,36	0,459	0,104	0,564	0,075	0,473	4,28	0,099	0,297	0,036	0,219	0,031	246	1,13	23,6	114	2,62	2,16	-6,14	4,45			
Dionysos- tempel	PgDiTAS208,1_2a	a			0,296	0,12236	w																									-6,09	4,42	
Pg DiT	PgDiTAS208,1_3a	a					w																											
Pg DiT	PgDiTAS208,2a	a			0,371	0,12041	w																									-6,14	4,52	
Pg DiT	PgDiTAS208,2_2a	a					w																									-6,09	4,62	
Pg Kou	Pg_KourAS205_1	a					w																									-2,86	2,82	
Kouros	Pg_KourAS205_2	a					w																										-3,08	2,92
Pg MarS	PgMarSAS210,1_1a	a	1,2	0,20	0,36	0	w	5 Y 8/1	2,14	1,23	0,285	1,17	0,211	0,047	0,282	0,039	0,255	3,49	0,066	0,213	0,030	0,207	0,030	226	0,23	7,70	111	4,70	2,04	-2,48	1,57			
Marmor- saal	PgMarSAS210,1_3a	a	1,4	0,28			w																									-2,63	1,65	
Pg MarS	PgMarSAS210,2_2a	a	1,4	0,28			w																									-2,88	1,45	
Pg MarS	PgMarSAS210,2_2a	a	1,4	0,28			w																											
Pg MarS	PgMarSAS210,2_3a	a	1,4	0,28			w																									-2,59	1,47	
Pg MaTpl	PgMaTAS209_1a	a	1,4	0,55	0,14	0	w	N8	0,588	0,29	0,076	0,342	< 0,1	< 0,02	0,088	0,015	0,112	1,52	0,028	0,083	< 0,01	0,075	< 0,01	18,2	0,31	5,22	176	6,26	0,10	-1,63	2,63			
Markttem- pel	PgMaTAS209_2a	a	2	0,93			w																									-0,81	2,90	
Pg MaTpl	PgMaTAS209_3a	a					w																									-1,02	2,99	
Pg Tha	PgAk1a_tha	a	3,6	1,33	0,27	0,06379	w	N8- N7																								0,02	3,10	

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC		
Tempel R																																	
Pg Tha	PgAk1a_tha_2a		5	1,82	0,27	0,06379	w		0,952	0,24	0,131	0,605	0,128	0,028	0,181	0,025	0,166	2,13	0,039	0,120	0,016	0,102	0,012	26,2	0,40	17,60	113	6,56	0,23	0,17	3,02		
Pri	Pri_1Ccw_127	q	1,6	0,67	0,089	0,000	w	N9- N8	2,80	2,11	0,485	2,11	0,507	0,125	0,697	0,099	0,585	4,90	0,121	0,341	0,043	0,247	0,038	125	0,25	22,9	80,9	2,63	1,55	-7,86	2,33		
Priene																																	
Pri	Pri_2_128a	q	2	0,53	0,405	16,5708	wg	N7 & 10YR 8/6																									
Pri	Pri_2_128b	q		0,114	5,42775		wg	N7 & 5R 3/4																									
Pri	Pri_20	q	1	0,430	0,306	0,14349	w	N9- N8 + 5Y 8/1	0,71	0,89	0,167	0,69	0,150	0,035	0,149	0,018	0,121	0,71	0,021	0,059	< 0,01	< 0,05	< 0,01	188,8	0,44	15,75	57,5	3,73	3,28	-3,64	1,36		
Pri	Pri_3_129	q	0,8	0,36	0,247	3,75213	w	N9- N8	3,01	2,56	0,561	2,32	0,545	0,130	0,677	0,098	0,620	5,29	0,132	0,368	0,045	0,273	0,041	219	0,73	9,55	87,9	< 2,5	2,49	-6,48	-0,42		
Pri	Pri_4/2	q	1,4	0,67			w		3,686	1,866	0,717	2,909	0,623	0,144	0,828	0,120	0,763	6,14	0,148	0,426	0,056	0,316	0,048	146,6	0,85	7,80	67,5	< 2,5	2,17	-5,72	1,94		
Pri	Pri_4_130	q	1,4	0,670	0,224	1,78534	w	N9-N8	3,75	1,99	0,728	2,86	0,626	0,146	0,822	0,116	0,713	5,66	0,138	0,403	0,050	0,311	0,045	119	0,67	7,34	79,7	< 2,5	1,49	-5,65	1,75		
Pri	Pri_7d	q	2	0,57			wg	N7 + N8																									
Pri	Pri_7w_132a	q	1,4	0,65			w	N9	2,66	2,32	0,510	2,26	0,519	0,126	0,730	0,104	0,700	5,45	0,147	0,408	0,057	0,324	0,044	261	1,70	15,8	64,1	3,15	4,06	-5,66	-0,49		
Pri	Pri_7wg_132b	q			0,285	6,34472	wg	N7- N6	2,35	1,71	0,437	2,00	0,464	0,128	0,816	0,116	0,799	8,28	0,176	0,529	0,066	0,393	0,056	76,0	0,87	16,4	94,7	< 2,5	0,80	-4,86	0,88		
Pri	Pri_Gm_Pr31-1	q	1,6	0,53			w	N8- N7- N6- N5																									
Pri	Pri_Pr2Ge	q	2,2	0,740	0,288	0,56037	w		0,147	0,123	0,025	0,095	0,016	< 0,01	< 0,04	< 0,006	0,030	0,450	< 0,007	0,027	< 0,007	0,030	< 0,008	33,5	0,51	5,81	204	< 2,5	0,16				
Pri AT Priene Athenatempel				1	0,46																												
Pri AT	PriAthAnt1_64	a	0,8	0,350	0,275	0,51383	w	N8- 5Y 8/1	1,24	1,08	0,234	0,971	0,194	0,046	0,253	0,036	0,225	2,68	0,051	0,154	0,019	0,114	0,016	281,4	0,37	11,9	111,7	< 5	2,52	-2,08	4,62		
Samos Heraion																																	
Sam	SamAS206_1	a	0,8	0,330	0,283	0,06189	w		1,26	0,89	0,215	0,879	0,186	0,040	0,223	0,036	0,223	2,69	0,053	0,161	0,018	0,131	0,021	198	0,35	13,8	118	5,99	1,67		4,31		
Sam	SamAS206_2	a	1	0,53			w																										
Sam	SamAS206_3	a		0,284	0,06241	w	N9- N8- N7																										
TF																																	
TF	TF_B34-2-u2	a	2,8	0,77			w	N 8.5																									
Telephos- fries Perga- monaltar																																	
TF	TF_B34-01	a	2,6	0,71			w		0,271	0,19	0,042	0,170	0,034	0,010	0,053	0,009	0,073	1,18	0,017	0,059	0,010	0,048	0,008	35	0,24	5,2	146	0,24	-2,30	3,40			
TF	TF_B34-02o	a	3	0,67			w		0,269	0,26	0,045	0,166	0,037	0,01	0,059	0,009	0,066	0,945	0,017	0,055	0,007	0,047	0,008	80	0,25	6,7	187	0,43	-3,20	3,30			
TF	TF_B39-01	a	2,6	0,56			w	N 8.5	1,850	0,54	0,338	1,310	0,270	0,08	0,417	0,066	0,441	5,09	0,105	0,332	0,046	0,279	0,040	35	0,26	6,7	203	0,17	-0,98	2,70			
TF	TF_B5-01a	a	2	0,36			w		0,912	0,37	0,170	0,710	0,156	0,05	0,226	0,037	0,262	3,17	0,061	0,195	0,027	0,168	0,028	45	0,53	5,0	159	0,28	-9,30	2,60			
TF	TF_B5-01b	a	2,2	0,71			w		0,862	0,36	0,161	0,633	0,131	0,04	0,217	0,036	0,238	2,94	0,059	0,177	0,026	0,154	0,026	42	0,69	5,5	162	0,26	-9,20	2,60			
TF	TF_B5-01c	a					w		0,932	0,39	0,180	0,709	0,149	0,05	0,253	0,038	0,261	3,04	0,060	0,187	0,027	0,08	0,027	45	0,62	5,7	155	0,29	-9,30	2,70			
TF	TF_B5-1d_01	a		0,27	1,63261		w	N 8.5	0,909	0,37	0,169	0,755	0,165	0,042	0,241	0,035	0,241	3,11	0,058	0,185	0,025	0,162	0,026	44,5	0,67	9,00	155,2	< 5	0,29				
TF	TF_B8-01dkl	a					w	N8- N7	1,740	0,39	0,361	1,37	0,294	0,080	0,401	0,063	0,411	4,05	0,093	0,278	0,039	0,234	0,036	35	0,48	4,5	144	0,24	-9,30	2,60			
TF	TF_B8-01u	a	3	0,74			w	N 8.5	1,440	0,40	0,274	1,04	0,224	0,06	0,310	0,048	0,312	3,41	0,075	0,228	0,032	0,190	0,028	37	0,36	6,0	155	0,24	-9,30	2,70			
TF	TF_B8-1a_01	a		0,286	0,17487		w	N 8.5	1,46	0,43	0,267	1,14	0,235	0,059	0,300	0,047	0,313	3,39	0,069	0,221	0,029	0,183	0,026	22,6	0,44	10,6	141,5	< 5	0,16				
TF	TF_Fr11-1	a	2,6	0,65			w		0,516	0,43	0,096	0,372	0,07	0,02	0,105	0,017	0,124	1,62	0,029	0,095	0,014	0,084	0,012	40	0,302782	7,0	210	0,19	-0,70	2,50			
TF	TF_Fr1-4	a	3,2	0,83			w	N 8.5	0,554	0,33	0,103	0,402	0,088	0,02	0,127	0,021	0,150	1,70	0,035	0,111	0,015	0,102	0,014	37	0,292683	22,4	204	0,18	-11,70	2,60			
TF	TF_Fr16	a	3	0,57			w		0,174	0,17	0,030	0,107	0,022	0,01	0,039	0,006	0,045	0,71	0,011	0,039	0,006	0,034	0,005	32	0,268408	9,0	192	0,17	-0,90	3,40			
TF	TF_Fr16_01	a	3	0,80	0,262	0	w	N 8.5																									
TF	TF_Fr2	a	2,6	0,54			w		0,618	0,28	0,108	0,404	0,072	0,02	0,121	0,019	0,136	1,74	0,031	0,101	0,014	0,086	0,014	30	0,234064	5,7	185	0,16	-8,90	2,60			
TF	TF_Fr2_01	a	2,6	1,180	0,275	0	w	N 8.5																									
TF	TF_Fr33	a	2,4	0,71			w		0,325	0,32	0,061	0,225	0,043	0,01	0,068	0,011	0,082	1,21	0,018	0,062	0,010	0,048	0,007	35	0,277111	5,0	141	0,25	-0,70	3,50			
TF	TF_Fr50	a					w		0,583	0,34	0,103	0,412	0,08	0,03	0,123	0,021	0,148	2,11	0,036	0,120	0,016	0,096	0,015	29	0,296856	6,6	217	0,13	-5,00	2,80			
TF	TF_P40-01	a					w		0,851	0,47	0,144	0,554	0,122	0,03	0,164	0,028	0,189	2,3	0,047	0,141	0,017	0,114	0,018	50	0,241919	8,0	190	0,26	-3,40	3,40			
TF	TF-P01-u1_01	a					w	N 8.5																									
TF	TF-P11-21u-1	a	3,4	0,57			w		0,864	0,39	0,168	0,642	0,14	0,040																			

Herkunft	Probenbez	a/q	mgs1	ags1	Quarz % XRD	Dolomit XRD	Farbe	M RCC	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Fe	Mg Gew%	Mn	Sr	Zn	Fe/Sr	dO	dC			
TF	TF-P5-01	a					w		0,564	0,30	0,100	0,407	0,087	0,02	0,136	0,022	0,153	1,93	0,037	0,115	0,016	0,098	0,015	69	0,266733	4,2	163		0,43					
Thasos	Thas_Cry	q					w	N7-N6	1,48	0,75	0,233	0,998	0,200	0,053	0,261	0,036	0,268	3,48	0,059	0,200	0,023	0,170	0,024	164,8	0,27	12,06	138	3,68	1,19					
Tha	Thas_AI_Tha31	q	5,4	1,54	0,273	0	w		1,549	0,51	0,274	1,178	0,246	0,064	0,344	0,051	0,348	4,09	0,081	0,251	0,034	0,207	0,031	84,9	0,26	80,9	89,5	< 5	0,95	-1,93	3,10			
Tha	Thas_AI_Tha32	q	6,6	1,54			w		1,154	0,40	0,219	0,967	0,222	0,052	0,292	0,040	0,266	3,07	0,059	0,174	0,022	0,158	0,021	69,5	0,37	16,18	109	6,01	0,64					
Tha	Thas_Pri	q					w	N8-N7	0,434	0,42	0,067	0,305	0,071	0,017	0,093	0,012	0,107	1,38	0,026	0,082	0,010	0,081	0,011	170,4	10,01	79,59	31,4	2,89	5,42					
Thessa- lien	Ax 21	q					w	N8.8	1,421	0,75	0,345	1,576	0,388	0,091	0,507	0,075	0,504	4,66	0,114	0,331	0,041	0,265	0,033	86,3	0,34	5,58	195	6,53	0,44	-4,52	4,00			
Thes	Ax 29/3	q					w																								-5,08	3,84		
Thes	Ax 30/1	q					w																									-6,05	3,40	
Thes	Ax 9	q					w																										-8,22	2,81
Thes	Kst 24	q					w		0,440	0,29	0,067	0,289	0,056	< 0,02	0,085	< 0,02	0,079	1,082	0,019	0,067	< 0,02	0,051	< 0,01	248,9	2,85	24,76	131	8,06	1,90	-5,22	2,96			
Thes	Tembi-23	q							1,31	0,606	0,187	0,808	0,155	0,039	0,214	0,028	0,214	2,72	0,048	0,151	0,021	0,137	0,021	37,7	0,22	11,64	122	5,08	0,31	-4,58	3,38			
Thes	Thess_MTRI10	q							0,217	0,184	0,033	0,158	0,026	< 0,007	0,049	0,006	0,063	0,93	0,015	0,056	0,006	0,045	0,005	23,3	0,30	10,13	232	< 2,5	0,10	-4,12	2,81			
Thes	Thess_MTRI15	q							0,14	0,130	0,021	0,087	0,019	< 0,007	0,033	< 0,005	0,026	0,37	< 0,006	0,014	< 0,004	0,015	< 0,005	46,5	0,49	36,36	146	< 2,5	0,32	-5,23	3,22			
Thytaria	Thyt-Ox_1	q					w		0,051	0,03	< 0,01	< 0,09	< 0,06	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03	0,08	< 0,01	< 0,03	< 0,01	< 0,05	< 0,01	14,9	0,13	2,50	778	3,91	0,02	-7,32	1,73			
Thytaria	Thyt-Ox_2	q					w																											
Troja	Illion_Sch9585	a	2,3	0,70	0,242	0	w	N8.5	0,38	0,26	0,064	0,30	0,055	< 0,02	0,094	< 0,02	0,103	1,58	0,025	0,080	< 0,02	0,072	0,011	18,7	0,30	7,85	183	3,30	0,10	-0,50	2,84			
Tro	Illion_Tr.9585	a	2,4	0,63			w	N9- N8																									-0,50	2,88
Wunsiedel	Wuns1	q	4	1			w	N8- N7- N6	1,12	2,10	0,266	1,050	0,216	0,042	0,246	0,033	0,228	1,69	0,044	0,147	0,016	0,132	0,018	583,3	0,19	46,75	165	< 2,5	3,54	-9,68	0,34			
Wuns	Wuns2	q	3,4	1,25			w		0,59	1,02	0,127	0,514	0,106	0,022	0,127	0,017	0,114	0,80	0,023	0,065	< 0,007	0,051	< 0,008	172,1	0,17	14,59	175	< 2,5	0,98	-6,76	1,03			

10.15 Zuordnung von Lagerstätten- und Museumsmarmoren durch Diskriminanzanalyse, antike Objekte in Fettdruck

Auswahlvariablen: MGS2, ΣREE, ΣREE/Y, La/Ce, Mg, Fe, Mn, Sr, Fe/Sr, δO und δC

Fallnummer	Probenbezeichnung	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe				Zweithöchste Gruppe			
			Lagerstätte	Vorherges. Gruppe	P(D>d G=g)	P(G=g D=d)	Quadr. Mahalanobis-Abstand z Zentroid	Gruppe	P(G=g D=d)	Quadr. Mahalanobis-Abstand z Zentroid
				** Falsch klassifizierter Fall	p	df				
6	Afr13b_mod_149	1 Aphrodisias	1	,633	11	,993	8,879	5	,003	20,501
8	Afr2_139	1	22(**)	,757	11	,574	7,498	5	,189	5,434
9	Afr3antCcwgr_140a	1	1	,000	11	1,000	83,594	4	,000	97,580
11	Afr4_141	1	5(**)	,515	11	,495	10,173	1	,260	11,194
12	Afr5/2	1	22(**)	,695	11	,571	8,201	1	,216	5,600
13	Afr5_142	1	7(**)	,908	11	,507	5,446	5	,257	5,835
15	Afr6_143	1	7(**)	,981	11	,388	3,552	5	,364	2,710
16	Strat15_112	2 Stratonikeia	2	,028	11	1,000	21,602	4	,000	59,509
17	Strat16w_113a	2	2	,031	11	1,000	21,274	12	,000	78,780
18	Strat18wCc_115a	2	2	,399	11	1,000	11,538	12	,000	82,532
19	Strat18wrCc_115b	2	2	,652	11	1,000	8,675	12	,000	76,447
20	StratWkav-20	2	2	,647	11	1,000	8,733	12	,000	48,141
21	StratWKav20Ccdol_116	2	2	,800	11	1,000	6,983	12	,000	35,573
22	StratWKav21Cc_117a	2	2	,905	11	1,000	5,496	12	,000	53,477
23	StratWKav21Cc_117b	2	2	,000	11	1,000	99,311	12	,000	174,233
28	Eur_146	4 Euromos	6(**)	,583	11	,892	9,422	7	,090	15,561
35	Eur_P6_104	4	4	,387	11	1,000	11,694	1	,000	37,618
37	Eur_P6a_105	4	4	,454	11	1,000	10,878	7	,000	55,592
38	DidNaiskDy12	5 Herakleia	7(**)	,955	11	,715	4,443	5	,280	5,343
45	Hk_regenbr_HK5	5	7(**)	,880	11	,576	5,895	5	,421	5,552
48	Hk_Buc_Hk23	5	5	,876	11	,827	5,964	7	,095	11,268
49	Hk_Cc_P5_103	5	5	,995	11	,627	2,604	7	,313	4,962
50	Hk_geb_P4_102	5	22(**)	,033	11	,858	21,011	4	,060	20,089
52	DidNaiskAS212_1	5	7(**)	,952	11	,797	4,533	5	,200	6,329
54	MT-Mil-Ma-Mt33a	5	5	,998	11	,682	2,149	7	,273	4,954
59	MT-Rank_AS202.11a2	5	5	,998	11	,773	2,046	7	,203	5,694
62	DidSteing_Dy2	6 Milet Ost	6	,991	11	,992	2,945	7	,007	14,297
65	MT-O_G-MT2_1	6	6	,065	11	,486	18,809	17	,426	17,686
68	MT-O_GB-MT11	6	6	,697	11	,846	8,178	22	,130	16,779
73	MT-O_P1_100	6	6	,998	11	,959	2,103	7	,033	10,383
74	MT-O_P2_101	6	6	1,000	11	,964	1,248	22	,034	12,775
76	MT-O_graustr-MT3	6	6	,009	11	,922	24,982	22	,072	34,941
82	MT-W_G4_MT47	7 Milet West	7	,956	11	,680	4,419	5	,245	5,488
83	MT-W_G5	7	7	,767	11	,861	7,385	5	,119	10,377
84	MT-W_G6	7	6(**)	,829	11	,793	6,617	7	,167	11,278
85	MT-W_MT_West	7	5(**)	,920	11	,536	5,230	7	,462	6,498
86	MT-W_MW2/2	7	7	,994	11	,540	2,748	5	,457	2,112
87	MT-W_MW2Cc_134	7	7	,996	11	,701	2,446	5	,297	3,190
88	MT-W_MW3/2	7	7	1,000	11	,721	,452	5	,261	1,516
89	MT-W_MW3_135	7	5(**)	,815	11	,516	6,795	7	,440	8,086
94	DidArkap_68/4	7	7	,643	11	,890	8,774	5	,072	12,825
97	DidArK_AS2.04_2	7	7	,533	11	,938	9,975	5	,056	14,624
99	Mg_MagArtAltar1.3-249_63	7	5(**)	,580	11	,709	9,457	7	,281	12,280
101	MT-FaustAS1794L	7	7	,628	11	,780	8,932	5	,160	11,130
102	MT_MiRaSch1_62	7	7	,981	11	,620	3,572	5	,299	4,056
122	Car2	12 Carrara	6(**)	,979	11	,987	3,666	17	,010	11,530

Fallnummer	Probenbezeichnung	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe				Zweithöchste Gruppe				
			Lagerstätte	Vorherges. Gruppe	P(D>d G=g)		Quadr. Mahalanobis-Abstand z Zentroid	Gruppe	P(G=g D=d)		Quadr. Mahalanobis-Abstand z Zentroid
				** Falsch klassifizierter Fall	p	df					
123	Car3543	12	12	,000	11	1,000	49,285	23	,000	79,573	
126	GF_109E_car	12	12	,000	11	,986	40,489	2	,014	50,964	
138	Hym16	17 Hymettos	17	,337	11	1,000	12,362	6	,000	43,935	
139	Hym17	17	17	,998	11	,997	2,041	6	,003	15,155	
140	PgMarSAS210,1_1	17	17	,414	11	,613	11,358	6	,315	14,077	
145	MgLs1P_1	20 Magnesia	20	,980	11	1,000	3,626	22	,000	30,727	
147	MgLs1S_1	20	20	,976	11	1,000	3,776	22	,000	38,000	
153	MgATSi2h	20	20	,432	11	1,000	11,134	22	,000	35,780	
165	MgATGFSi2d	20	20	,155	11	1,000	15,649	22	,000	81,175	
170	MgATSimah	20	20	,825	11	1,000	6,667	22	,000	44,180	
182	GF_106/E_mm	22 Marmara	22	,739	11	,995	7,710	1	,002	15,167	
183	GF_101_33	22	22	,972	11	1,000	3,925	1	,000	16,067	
185	GF_106	22	22	,868	11	1,000	6,077	1	,000	24,344	
187	GF_11-2_29	22	22	,998	11	1,000	2,022	6	,000	18,876	
190	GF_111-2-42	22	22	,934	11	1,000	4,944	6	,000	20,603	
191	GF_111-3-43	22	22	,849	11	1,000	6,353	6	,000	26,001	
193	GF_112_47	22	22	,999	11	1,000	1,614	6	,000	16,244	
194	GF_113	22	22	,999	11	1,000	1,746	6	,000	13,101	
195	GF_117	22	22	,999	11	,999	1,593	1	,001	11,967	
196	GF_117_51	22	22	,999	11	1,000	1,868	6	,000	14,129	
197	GF_118-1_54	22	22	,857	11	,994	6,236	6	,004	12,676	
199	GF_120	22	22	1,000	11	1,000	1,466	1	,000	16,932	
201	GF_76,1,2	22	22	,999	11	1,000	1,816	6	,000	18,761	
203	GF_78,1	22	22	,999	11	,999	1,996	1	,001	11,744	
206	GF_82,1a	22	22	,999	11	1,000	1,781	1	,000	14,380	
210	GF_83,1a	22	22	,982	11	1,000	3,530	6	,000	19,318	
213	GF_85,1	22	22	,999	11	1,000	1,748	1	,000	13,672	
216	GF_86,1,1	22	22	,921	11	1,000	5,193	6	,000	18,086	
220	GF_86,1,4i	22	22	,994	11	1,000	2,761	6	,000	15,552	
222	GF_86,1,5b	22	22	,977	11	1,000	3,739	1	,000	19,050	
227	GF_88,1	22	22	,994	11	1,000	2,713	6	,000	20,912	
229	GF_88/1	22	22	,983	11	1,000	3,443	1	,000	14,965	
232	GF_90	22	22	,990	11	1,000	3,038	6	,000	16,739	
236	GF_92_30	22	22	,316	11	,998	12,660	40	,002	18,131	
237	GF_93_31	22	22	,987	11	1,000	3,267	6	,000	18,714	
238	GF_97,1	22	22	,996	11	1,000	2,472	6	,000	18,145	
259	Mm_DC5,6h	22	22	,369	11	,670	11,935	1	,151	10,364	
260	Mm_DC7	22	22	,964	11	,998	4,203	1	,001	14,590	
263	Mm_DCGw7C	22	22	,956	11	,995	4,423	6	,003	11,460	
264	Mm_DCw5Cc	22	22	,316	11	,556	12,667	7	,277	10,752	
265	Mm_Dinc_Cc1	22	22	,712	11	1,000	8,020	40	,000	21,934	
266	Mm_Dinc_Cc2	22	22	,618	11	1,000	9,044	40	,000	23,076	
267	Mm_Dol_2_Colak	22	22	,000	11	1,000	99,062	1	,000	111,843	
269	Mm_Ham_Sil1	22	22	,838	11	,991	6,500	7	,003	14,534	
270	Mm_Ham_Sil2	22	22	,889	11	,999	5,755	23	,001	16,579	
273	Mm_KA11Cc	22	22	,934	11	,995	4,942	5	,001	13,753	
275	Mm_KA12Cc	22	22	,824	11	1,000	6,681	1	,000	21,685	
282	Mm_Me1Cc	22	22	,916	11	,999	5,287	1	,000	17,493	
284	Mm_rem_1h	22	22	,881	11	1,000	5,884	1	,000	21,244	

Fallnummer	Probenbezeichnung	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe					Zweithöchste Gruppe			
			Lagerstätte	Vorherges. Gruppe	P(D>d G=g)		P(G=g D=d)	Quadr. Mahalanobis-Abstand z Zentroid	Gruppe	P(G=g D=d)	Quadr. Mahalanobis-Abstand z Zentroid
					p	df					
289	Mm_SarO4	22	22	,552	11	1,000	9,766	1	,000	22,988	
290	Mm_Silfa8Cc	22	22	,934	11	,964	4,936	5	,017	8,774	
296	Mm_DC_Aks_h	22	22	,253	11	1,000	13,654	6	,000	30,745	
299	Mm_rem1d	22	20(**)	,010	11	,503	24,651	22	,497	29,893	
302	Ef-HT_Ef1	22	22	,509	11	,994	10,234	7	,003	18,894	
304	Ef-HT_Ef3	22	22	,018	11	,562	22,975	4	,356	17,646	
306	AthEum2_1	22	22	,697	11	,447	8,177	7	,290	5,732	
309	PgDem1_59b	22	22	,996	11	,999	2,449	6	,001	12,319	
314	PgMaTAS209_1	22	22	,972	11	,981	3,912	6	,019	6,942	
317	Illion_Sch9585	22	22	1,000	11	1,000	1,498	1	,000	15,121	
320	TF-P1-u2	22	22	,207	11	,994	14,492	1	,006	20,144	
322	TF-P11-21u-1	22	22	,960	11	1,000	4,322	1	,000	16,169	
324	TF-P22(Bein)	22	22	,922	11	1,000	5,176	6	,000	25,177	
326	TF-P44-A1	22	22	,968	11	,999	4,059	1	,000	14,745	
330	TF_B34_1	22	22	,963	11	1,000	4,207	1	,000	18,961	
331	TF_B34_2	22	22	,822	11	1,000	6,716	1	,000	18,762	
332	TF_B39_1	22	22	,446	11	1,000	10,971	6	,000	28,881	
333	TF_B5_1a	22	22	,520	11	,987	10,111	40	,011	12,002	
334	TF_B5_1b	22	22	,799	11	,999	7,002	40	,000	15,869	
335	TF_B5_1c	22	22	,787	11	1,000	7,146	40	,000	18,386	
337	TF_B8_01dkl	22	22	,011	11	1,000	24,429	17	,000	36,715	
338	TF_B8_01u	22	22	,227	11	1,000	14,100	40	,000	26,125	
340	TF_Fr1-4	22	22	,078	11	,998	18,160	1	,002	26,240	
341	TF_Fr11-1	22	22	,978	11	,998	3,716	1	,001	12,986	
342	TF_Fr16	22	22	,806	11	1,000	6,909	1	,000	21,555	
344	TF_Fr2	22	22	,850	11	1,000	6,330	1	,000	18,314	
346	TF_Fr33	22	22	,920	11	1,000	5,222	1	,000	22,263	
347	TF_Fr50	22	22	,994	11	1,000	2,664	6	,000	18,184	
348	TF_P40-01	22	22	,987	11	1,000	3,237	40	,000	19,467	
349	MyLS_28/2	23 Myus LS	23	,990	11	1,000	3,046	22	,000	27,723	
350	MyLS_28Cc_123	23	23	,986	11	1,000	3,325	22	,000	29,872	
352	DidArCoIC_AS202.4_2	23	23	,904	11	1,000	5,510	22	,000	42,165	
354	MT_MiDeKy_65	23	23	,806	11	1,000	6,909	40	,000	22,437	
355	MT_MiDePI_67	23	23	,916	11	1,000	5,290	7	,000	22,382	
356	MT_MiDeVo_66	23	23	,951	11	1,000	4,550	40	,000	22,543	
357	MyWg_1-2	23	23	,968	11	,987	4,063	7	,010	14,192	
358	MyWg1-2_69	23	23	,965	11	1,000	4,164	22	,000	27,757	
486	Lon2	40 Penteli	40	,982	11	,871	3,496	6	,074	10,633	
493	Pent2_1	40	40	,982	11	,999	3,496	23	,000	22,230	

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Su SEE	ΣSEE/Y	La/Ce	Y/Ho (mol)	Ce* PAAS (LaCePr)	Ce* Chon1
Gehalt ppm	11,93	22,48	2,95	11,47	2,12	,44	1,71	,23	1,26	6,20	,22	,59	,07	,40	,05	55,9	9,02	,53	51	,87	,91
	Eu/Ce ,02	La/Lu 236,7	Hf ,16	Pb 13,58	Th 13,03	U ,61	Rb 19,8	Sr- 104,38	Zr 3,6	Cs 2,1	Ba 183	Fe/Sr 180	K 2035	Na 980	Zn 15	Mn 205	Fe 18795				

Tabelle 40: (Anhang) Geochemische Merkmale eines Vulkanits vom Kozak

10.16 Publikationsliste

- CRAMER, T., GERMANN, K. & WINKLER, F. J. (1996a): *Caratteristiche dei Marmi del Fregio di Telefo* – In: L'Altare di Pergamo, il fregio di Telefo, 146-148, Milano
- CRAMER, T., GERMANN, K. & WINKLER, F. J. (1996b): *Characteristics of the Telephos Frieze Marble* – In: DREYFUS, R. & SCHRAUDOLPH, E. (Hrsg.) Pergamon - The Telephos Frieze from the Great Altar, Vol. 2, 155-158, (Katalog Fine Arts Museum, San Francisco).
- CRAMER, T. (1998): *Die Marmore des Telephosfrieses am Pergamonaltar* – Berliner Beiträge zur Archäometrie, **15**: 95-198.
- CRAMER, T., GERMANN, K., WINKLER, F. J. & SCHMIDT, H. L. (1998): *Isotope-geochemical and mineralogical-petrographic characteristics of the Pergamon Altar marble* – Isotopes Environ. Health Stud., **34**: 169-176.
- CRAMER, T., GERMANN, K. & HEILMEYER, W.-D. (2000): *Petrographic and geochemical characterization of the Pergamon Altar marble in the Pergamon Museum Berlin* – In: ASMOSIA 2000: VI International Conference, Venice, June 15-18, 2000: Abstracts (Istituto Universitario di Architettura di Venezia, Dipartimento di Storia dell'Architettura, Laboratorio di Analisi dei Materiali Antichi).
- CRAMER, T., GERMANN, K. & HEILMEYER, W.-D. (2001): *Herkunfts- und verwendungstypische Materialeigenschaften von Marmoren ausgewählter Grabungsfunde der Antikensammlung, Staatliche Museen zu Berlin, Preussischer Kulturbesitz.* – In: SCHÜSSLER, U. & FUCHS, R. (Hrsg.) Archäometrie und Denkmalpflege - Kurzberichte Archäometrietagung Köln 2001, ISSN 0949-4057, 50-52, Köln
- CRAMER, T., GERMANN, K. & HEILMEYER, W.-D. (2003a): *Petrographic and geochemical characterization of the Pergamon Altar marble in the Pergamon Museum Berlin* – In: LAZZARINI, L. (Hrsg.) ASMOSIA VI, Interdisciplinary Studies on Ancient Stone - Proceedings of the Sixth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Venice, June 15-18, 2000, 285-292, Padova (Aldo Ausilio - Bottega d'Erasmus Editore).
- CRAMER, T., GERMANN, K., HEILMEYER, W.-D. & KÄSTNER, V. (2003b): *Marble objects from Asia Minor in the Berlin Collection of Classical Antiquities: characteristics and provenance* – In: ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, Book of Abstracts, p.37,
- CRAMER, T., GERMANN, K. & KÄSTNER, V. (2003c): *Weitere Untersuchungsergebnisse zur Herkunftsbestimmung von Marmorobjekten der Berliner Antikensammlung* – In: HAHN, O., GOEDICKE, C., FUCHS, R. & HORN, I. (Hrsg.) Archäometrie und Denkmalpflege - Kurzberichte zur Archäometrietagung 2003, Berlin, ISSN 0949-4057, 178-180,
- CRAMER, T., GERMANN, K., KÄSTNER, V., DULSKI, P. & HUBBERTEN, H.-W. (2003d): *Marbles in the Berlin Collection Of Classical Antiquities: Characteristics and provenance.* – In: 4th Symposium on Archaeometry of the Hellenistic Society of Archaeometry, 28-31 May 2003 - Abstracts, p.102, Athens
- CRAMER, T. (2004): *Werksteine der Antike im Spannungsfeld von Geologie, Materialeigenschaften und Verwendung* – In: DOSTERT, A. & LANGE, F. (Hrsg.) Mittel und Wege. Zur Bedeutung von Material und Technik in der Archäologie, 219-244, Möhnensee (Bibliopolis).
- CRAMER, T., GERMANN, K., HEILMEYER, W.-D. & KÄSTNER, V. (in press-a): *Marble objects from Asia Minor in the Berlin Collection of Classical Antiquities: stone characteristics and provenance* – In: MANIATIS, Y. (Hrsg.) ASMOSIA VII - 7th International Conference - Thassos, Greece, 15-20 September, proceedings, 8 p., Athens
- CRAMER, T., GERMANN, K. & KÄSTNER, V. (in press-b): *Provenance determination of marble from Pergamon in the Berlin Collection of Classical Antiquities - methods and results* – In: PRIKRYL, R. (Hrsg.) Proceedings of International Conference *Lux et Lapis* 2002, Valtice, Czech Republic, 25 p., Prague, Czech Republic
- GERMANN, K. & CRAMER, T. (in press): *Methoden der Herkunftsbestimmung für Naturwerksteine - das Beispiel des Marmors* – In: SIEGESMUND, S. (Hrsg.)

10.17 Curriculum vitae

Name: Thomas Cramer
geboren: 4.3.1957 in Dortmund
Anschrift: Carr 6#5A-58, Interior 4, Apart 401, Bogotá, Kolumbien (seit 11/04)
Inlandspost: TU Berlin, Sekr. BH1, Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin
E-Mail: Cramer@bg.tu-berlin.de
Webpage: <http://www.lagerstaetten.tu-berlin.de/staff/cramer/cramer.html>

Familienstand: verheiratet

Schulbildung: Grundschule in Mannheim, 1963-1967
Gymnasium und Abitur in Ludwigshafen/Rh, 1968-1977
Wehrdienst: Fernmeldekompanie, 1977-1978

Berufsausbildung: Kfz-Mechaniker in Mercedes-Vertretung bei Hamburg, 1982/85

Hochschulausbildung:

Mineralogie an der Technischen Universität Berlin, 1990-1996
Schwerpunkte: Petrologie, Geochemie und Lagerstättenkunde
Vordiplom: "gut", 1993
Diplomarbeit: "Die Marmore des Telephosfrieses am Pergamonaltar - Ein Beitrag zu ihrer Herkunftsbestimmung mit petrographischen, geochemischen und isotopengeochemischen Untersuchungen", "sehr gut", 1996
Examen: 28.11.1996, Benotung 1,7
Dissertation/Promotion: 9/99-10/04: Multivariate Herkunftsanalyse von Marmor auf petrographischer und geochemischer Basis, Tag der mündl. Aussprache: 6.9.04, „*sehr gut*“

Berufliche Tätigkeiten:

1981-88 Betreuung in- und ausländischer Kunden (speziell Nigeria) der Firmen Waterservices und Habe Handelsgesellschaft Hamburg

1988-92 "Visa- und Konsularservice Thomas Cramer" (Hamburg und Berlin) mit 3 Angestellten: Visabeschaffung, Im- und Export, Kurierdienst und Kundenbetreuung,

1993-1996 Tutor mit Lehraufgaben am Institut für Mineralogie und Kristallographie der TU Berlin, alter und neuer Studiengang

6/1997- 7/1999 Angestellter im Umweltamt Berlin-Wedding: Geschiebegarten, Lokale Agenda 21, Umweltberatung, Schulumweltwettbewerbe, Recycling, Solarenergie, Böden etc.

8/99 –12/2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Geowissenschaften, FG Lagerstättenforschung, TU Berlin, DFG-Projekt: *Herkunfts- und verwendungstypische Materialeigenschaften von Marmoren ausgewählter Grabungsfunde der Antikensammlung, Staatliche Museen zu Berlin, Preussischer Kulturbesitz*

seit 5/03 Berater für mineralische Rohstoffe & Produkte, Umwelt und Archäometrie, Schwerpunkt Lateinamerika

Fremdsprachen: Spanisch (verhandlungssicher), Englisch (verhandlungssicher), Grundkenntnisse in Französisch, Portugiesisch, Italienisch, Türkisch und Serbokroatisch

Sonstiges: Einjährige Studienreise durch mehrere Länder Lateinamerikas 1978/79 und anschließende Auslandsaufenthalte, u.a. Argentinien, Bosnien, Serbien, Spanien, Türkei, Griechenland

Vorträge (Auswahl):

- ASMOSIA 2000 VI International Conference, Venedig, 15.-18.6.2000, s. CRAMER, T.: VI. ASMOSIA Weltkonferenz in Venedig. Mitteilungsblatt der Gesellschaft Deutscher Chemiker, Fachgruppe Analytische Chemie, 4/2000, S. M110-M111
- ASMOSIA 2003 VII International Conference, Thasos, Griechenland, 15.–20.9.2003
- HEILMEYER, W.-D., GERMANN, K., CRAMER, T. & KÄSTNER, V.: *Woher kommt der Marmor des Pergamonaltars? (Bericht über eine Studienreise)* Öffentlicher Vortrag, Pergamonmuseum, 06.6.2000
- CRAMER, T. & GERMANN, K.: *Herkunftsbestimmung an weißen Marmoren antiker Bauwerke und Skulpturen – das Beispiel des Pergamon-Altars*. XXX. Kolloquium für Prospektion und Exploration, TU Berlin, 23.-24.11.2000
- *Herkunftsbestimmung antiker Marmore*, Vortrag auf Analytica-Messe der GdCh in München am 25.4.2002 im Rahmen des Symposiums „Analytische Blicke in die Vergangenheit“
- CRAMER, T., GERMANN, K., KOCH-MOECK, M: *Naturwerkstein Marmor – Von der Antike zur Gegenwart*. Großposter und persönliche Erläuterungen auf dem von BGR, NLfB und GGA ausgerichteten „Rohstoffevent“ in Hannover vom 20.-22.6.02 in Zusammenarbeit mit Geowissenschaftlichen Instituten in Aachen, Clausthal-Zellerfeld, Freiberg, Halle
- *Provenance determination of marbles used in the antiquity* International Conference Lux et Lapis 2002 (Light and Stone) Valtice (Czech Republic), 12.-14.10.2002
- Vortrag auf 4. Symposium der Hellenic Society for Archaeometry (H.S.A.), Athen, 28.-31.5.03
- *dito* Jahrestagungen des Ak Archäometrie der DMG und GdCh in Köln 2001 und Berlin 2003

Berichte über das Projekt:

Wolfgang Lehmann: *Woher kommt der Marmor von Pergamon? – Forschung in Museen (IV): Archäologen und Geologen suchen nach der Herkunft von Göttern und Giganten*, Tagesspiegel, 7.8. 2001, Berlin

Peter Becker: *Herkunftsbestimmung von Gesteinen – Von der Insel Marmara nach Pergamon*. Natursteinmagazin 7/2001, Ulm, 81-82

Peter Becker: „*Woher kommt der Marmor des Pergamonaltars? – Neues Verfahren für die Herkunftsbestimmung entwickelt*“ Alumni-Magazin der Technischen Universität Berlin, 3. Jahrgang, Nr. 5, Dezember 2001

Anonym: *Analytische Blicke in die Vergangenheit – Charakterisierung von Kultur- und Gebrauchsgütern*. Bericht über archäometrisches Symposium und Marmorvortrag auf der Analytica in München 2002, Neue Züricher Zeitung, 23. 5. 2002

Kai Michel: „*Der Kampf der Götter gegen den Rost*“, Die Zeit, Nr. 12, 13.3.2003, S. 37