

Beachrockvorkommen im Korallenarchipel der Malediven

- ein topographisch-morphologischer Geneseansatz -



Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts Universität zu Kiel

vorgelegt von:

Dipl. Geogr. Albert J. Winterholler

Kiel

2006

Vorwort

Im Rahmen des von Prof. Dr. Christoph Preu († 9.9.2000) initiierten Forschungsprojektes „Environmental conservation and nature protection of the Maldives/Indian Ocean“ war es dem Autor möglich, auf zwei Forschungsreisen (1990 & 91) im Zuge der Inselvermessung einen ersten Kontakt zum Phänomen Beachrock zu erlangen. Prof. Dr. Christoph Preu war es auch der die Dissertation auf den Weg brachte und bis zu seinem tragischen Tod im September 2000 betreute. Ihm gebührt an erster Stelle mein ganz besonderer Dank.

Im Sommer 1994 erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Carl Engelbrecht eine weitere, privat finanzierte, Reise auf die Malediven, in deren Rahmen die Vermessung und Beprobung der Beachrockvorkommen durchgeführt wurde. Für die Bereitstellung der satellitengestützten Geländedaten, die neben den Profilmfahrten die Grundlage für die Auswahl der Testgebiete lieferten sei Ihm gedankt.

Mein herzlicher Dank gebührt an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. Horst Sterr (Geographisches Institut der Universität Kiel), der sich im Frühjahr 2002 bereit erklärte, die Arbeit weiter zu betreuen sowie Herrn Dr. Klaus Schwarzer (Geologie-Sedimentologie, Universität Kiel) für die Herstellung des Kontaktes nach Kiel. Beiden danke ich auch für die konstruktive Kritik bei der textlichen Umsetzung der Ergebnisse. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Dieter Kelleter (Institut für Geographie, Universität Duisburg-Essen), der sich bereit erklärte das Korreferat für die Dissertation zu übernehmen.

Weiterhin gebührt mein Dank all denen, die mich bei den Geländearbeiten und Laboranalysen unterstützt haben, als da sind:

- die „1994-iger Forschungscrew“: Frau Dipl. Ing. Monika Voss, Frau Dipl. Biol. Britta Jell, Herr Dipl. Geogr. Thomas Herz, sowie die Herren Werner Ostertag, Thomas Gaipel und Winfried Demmelmaier.
- die „Laborcrew“ des ISPA in Vechta: Herr Dr. Martin Kehl, Frau Monika Kohlbeck und Frau Claudia Dornieden
- der Fachgruppe Biologie der Universität Augsburg: Dr. Eckhard Hartmann und Frau Heinke Janusevitsch
- Herr Prof. Dr. Hermann Jerz (Geologisches Landesamt München) sowie Herr Reimers (Universität Kiel)
- Herr Prof. Dr. Armin Reller und Frau Silke Weigel (Institut für Festkörperchemie, Universität Augsburg)

„Last but not least“ gilt mein besonderer Dank meinen Eltern. Ohne Ihre Unterstützung in den ersten Forschungsjahren wäre die Dissertation nicht zustande gekommen.

Zusammenfassung

Seit mehreren Jahrzehnten findet eine intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Beachrockvorkommen verschiedenster Lokalitäten statt. Das zonale, überwiegend auf die tropischen und subtropischen Küstenräume beschränkte Phänomen der „in-situ“ verfestigten Strände zeigt eine hohe Variabilität hinsichtlich seiner Größendimensionen die von wenigen Quadratmeter großen, nur drei cm starken Platten bis hin zu kilometerlangen, über drei Meter mächtigen Bänken reichen. Ebenso zeigen die Beachrockvorkommen unterschiedlichste Charakteristika im Ausgangsmaterial, das sowohl rein silikatisch, vulkanisch oder karbonatisch sein kann, oder in verschiedensten Mischungen vorliegt, als auch in ihrem innerem Aufbau, der sich als homogenfeinschluffig, oder als heterogenes Gemisch mit Körngrößen bis 40 cm darstellt. Weiterhin differieren die Beachrocks stark in ihrem morphologischen Erscheinungsbild, das (unabhängig von der Größendimension) von einfachen meist seewärts geneigten Platten bis hin zu Vorkommen mit 15 Abstufungen (Niveaus) reicht. Dabei zeigen sich bei einem Großteil der globalen Beachrockvorkommen deutliche Anzeichen mechanischer Zerstörung bzw. abrasiven Überschleifens, als auch bioerosiver Überformung.

Der Forschungsschwerpunkt zur Ergründung von Bildungsmilieu und der bei der Genese beteiligten Prozessen liegt auf der chemischen und mineralogischen Analyse des Beachrock bzw. seiner Matrix, ohne dass dabei bis dato einheitliche Ergebnisse vorliegen. Die Analyse topographischer und morphologischer Daten fand bislang nur selten Berücksichtigung. Basierend auf dieser Tatsache erschien es sinnvoll, Beachrockvorkommen stärker nach topographisch-morphologischen Gesichtspunkten zu analysieren um weitere Hinweise auf Prozesse und Milieu der Beachrockbildung zu erlangen.

Dazu war es zunächst notwendig die Beachrockproben hinsichtlich ihrer chemischen, mineralogischen und sedimentologischen Zusammensetzung zu analysieren, um sie einem globalen Vergleich unterziehen zu können. Hierfür wurde die chemische Zusammensetzung der Beachrock- und Sedimentproben über die optische Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) ermittelt, die Zemente durch Dünnschliffauswertungen und rasterelektronenmikroskopische Analysen (ESEM - Environmental Scanning Electron Microscopy) bestimmt, und die Korngrößenzusammensetzungen durch manuelle Auszählungen quantitativ charakterisiert.

In der Kombination mit der Erfassung der topographisch-morphologischen Charakteristika (morphologischer Aufbau, Größe, Lage zum mittleren Meeresspiegel, vertikale Erstreckung, topographische Lage und Exposition) in Bezug zu den lokalen geomorphologischen und ozeanographischen Strukturen konnten weitere Rückschlüsse auf Prozessdynamik und Bildungsmilieu erlangt werden. Darauf aufbauend war es dann möglich die Bedeutung der Beachrockvorkommen für die Inselmorphologie und -dynamik zu ermitteln.

Der Vergleich mit Vorkommen anderer Lokalitäten hinsichtlich der verschiedenen Beachrock-Charakteristika zeigte, dass die Beachrockvorkommen im Nord Malé Atoll der Malediven keine Sonderstellung einnehmen und somit die erlangten Ergebnisse übertragbar sind. In den aus marinen Karbonaten aufgebauten Beachrockvorkommen des Nord-Malé Atoll zeigt sich Aragonit als primärer Zement. Die Korngrößenzusammensetzungen variieren, mit der Dominanz der Fraktionen unter 5mm, sowohl zwischen den einzelnen Vorkommen als auch innerhalb der Niveaus einzelner Beachrocks. Die Breiten der Vorkommen liegen zwischen 1 m und 18,5 m, die Längen zwischen 2,5 m und 650 m. Die Beachrocks besitzen (größenunabhängig) bis zu 8 Niveaus und unterliegen überwiegend mechanischer Zerstörung sowie biogener Überformung.

Entgegen der allgemein geltenden These der Beachrockbildung im Intertidal, sei es mit oder ohne Grundwassereinfluss, weisen die Ergebnisse der durchgeführten Analysen, allen voran die topographisch-morphologischen Auswertungen, eindeutig auf eine Genese im Supratidal hin.

Neben der Tatsache, dass die vertikalen Erstreckungen nicht mit dem Tidenhub übereinstimmen sondern meist darüber liegen, lassen sich die unterschiedlichen Mächtigkeiten der Luv- bzw. Leeseitigen Beachrocks nicht durch den Tidenhub erklären. Auch kann der differenzierte morphologische Aufbau der Beachrocks nicht über den Gezeiteneinfluss erklärt werden. Darüber hinaus findet im Intertidal-Bereich auf den Malediven der nicht unerhebliche uferparallele Sedimenttransport statt, und verhindert somit die Sedimentruhe, eine Grundvoraussetzung für Zementierungsvorgänge. Diese ist bei einer Sedimentakkumulation über der Hochwasserlinie durch hochenergetische Wellen, die als Einzelereignis oder als eine Abfolge einzelner, zeitlich versetzter und auch von der Auflaufrichtung her unterschiedlicher Wellen stattfinden, gegeben. Das zur Zementierung benötigte gelöste Kalziumkarbonat kann dann über Spritzwasser bzw. auslaufende Wellen in den Sedimentkörper eingebracht werden.

Zur Zeit ihrer Genese dienten die supratidalen Beachrockvorkommen nicht nur als Akkumulationsbasis für Lockermaterial, sondern boten ausreichenden Schutz für die abgelagerten Sedimente und hatten somit wohl einen direkten Einfluss auf die Inselgenese und deren Dynamik. Zwar haben die heutigen Vorkommen im Nord-Malé Atoll der Malediven vereinzelt immer noch ihre Funktion als Akkumulationsbasis behalten, jedoch zeigt sich, in Anbetracht der starken mechanischen Zerstörung der heutzutage im Intertidal befindlichen Beachrockvorkommen, das Nachlassen ihrer Schutzfunktion.

Die Problematik der Stranderosion an den Inseln zeigt sich auch und oftmals gerade im Bereich des Beachrock. Bei einem zukünftig zu erwartenden weiteren Anstieg des Meeresspiegels werden die Vorkommen weiter an stabilisierender Wirkung verlieren, und somit den Sedimentkörpern der Inseln keinen Erosionsschutz mehr bieten können.

Abstract

Since several decades there is an intense academic discourse about beachrock deposits at different places. The zonal phenomenon of so-called "in-situ" strengthened beaches, which is mainly focused on tropical and subtropical coastal areas, shows a high variability concerning size, source material, structure and morphology. Research trying to figure out both the formation environment and the evolution processes centres upon the chemical and mineralogical analysis of beachrock and its matrix. Yet there aren't any coherent results so far. The analysis of topographical and morphological data has only rarely been considered.

Based on that fact it seemed reasonable to analyse beachrock deposits more thoroughly according to topographical and morphological aspects in order to gain further hints concerning processes and milieu being involved in beachrock formation. Therefore it was first of all essential to analyse the beachrock samples with regard to their chemical, mineralogical and sedimentary composition in order to draw a global comparison. Combined with the acquisition of topographical and morphological features - with reference to the local geomorphological and oceanographical structure - further conclusions could be drawn regarding process dynamics and formation environment. As a result it was possible to establish the meaning of beachrock deposits for an island's morphology and dynamics.

Comparing the deposits of other places with regards to different beachrock features it became evident that the beachrock deposits of the Noth-Malé Atoll (Maldives) do not claim an exceptional position. Thus the acquired results are transferable. In contrast to the universal theory of beachrock formation in the intertidal the results of the conducted analysis - especially the topographical and morphological evaluation - clearly indicate a formation in the supratidal. The accumulation of sediments can either singularly occur as high energetic waves or as a sequence of separate waves that differ temporally and directional.

With a future rising of the sea level and considering both the massive mechanical destruction of today's intertidal beachrock deposits and the heavy beach erosion on the islands (especially in the beachrock region) the deposits will continue to lose their stabilising effect and will no longer protect the islands' sediments from erosion.

Inhalt

	Seite
Vorwort	I
Zusammenfassung	II
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Verzeichnis der Karten, Tabellen, Abbildungen und Bilder	VIII
1 Problemstellung und Zielsetzung _____	1
2 Zum derzeitigen Stand der Beachrockforschung _____	3
3 Charakteristika des Korallenarchipels der Malediven unter besonderer Berücksichtigung des Nord-Malé Atolls _____	12
3.1 Allgemeine Beschreibung	12
3.1.1 Sozio-ökonomische Strukturen	12
3.1.2 Geologische und geomorphologische Verhältnisse	14
3.1.2.1 Geologische Grundstrukturen.....	14
3.1.2.2 Atollgenese	14
3.1.2.3 Atollmorphologie.....	15
3.1.3 Klimatische und ozeanographische Verhältnisse.....	16
3.2 Die Inseln des Nord-Malé Atoll	19
3.2.1 Vegetation und Landnutzung	19
3.2.2 Inselmorphologie	20
3.3 Beachrock	22
3.3.1 Definition	22
3.3.2 Vorkommen im Nord-Malé Atoll	23
4 Untersuchungsmethoden _____	26
4.1 Geländearbeiten	26
4.1.1 Generelle Informationen.....	26
4.1.1.1 Auswahl der Testgebiete	26
4.1.1.2 Bestimmung des „Null-Niveau“	26
4.1.2 Vermessung der Inseln und Beachrockvorkommen	27
4.1.3 Beprobung	29
4.2 Probenaufbereitung	29

4.3 Laborarbeiten.....	29
4.3.1 Dünnschliffe und Rasterelektronenmikroskopie.....	29
4.3.2 Untersuchung der chemischen Zusammensetzung mittels ICP-OES	30
4.3.3 Korngrößenanalyse.....	30
4.4 Topographisch-morphologische Untersuchungen	31
5 Analyseergebnisse	32
5.1 Ergebnisse der Probenaufbereitung und Laboranalysen	32
5.1.1 Übersicht über Lage und Anzahl der Beachrockvorkommen	32
5.1.2 Ergebnisse der Probenaufbereitung	33
5.1.3 Ergebnisse der Dünnschliffauswertung	33
5.1.4 Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie	35
5.1.5 Ergebnisse der ICP-OES-Daten Analyse.....	40
5.1.6 Ergebnisse der Korngrößenanalyse.....	44
5.2 Ergebnisse der topographisch-morphologischen Untersuchungen	56
5.2.1 Übersicht über Bathymetrie und Morphologie in den Testgebieten	56
5.2.2 Exposition und topographische Lage	58
5.2.3 Größe, Höhenlage und Mächtigkeit	63
5.2.4 Morphologischer Aufbau	67
6 Synthese der Ergebnisse	82
6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Beachrockanalysen im globalen Vergleich ...	82
6.2 Beachrockgenese im Korallenarchipel der Malediven.....	90
6.3 Bedeutung der Beachrockvorkommen für Inselmorphologie und –dynamik	96
7 Diskussion – offene Fragen	99
Literatur	102
Anhang	
Faltblatt: Karten und Lageskizzen der Beachrockfundorte	

Verzeichnis der Karten, Tabellen, Abbildungen und Bilder

Seite

Karten

Karte 1:	Veränderungen der Strandlinie der Insel Hembadoo zwischen 20 1989 und 1994
Karte 2:	Lage der Testgebiete im Nord-Malé Atoll 28

Tabellen

Tabelle 1:	Zusammenfassende Darstellung verschiedener Arbeiten hinsichtlich 9 relevanter Beachrock-Charakteristika
Tabelle 2:	a) Zementzusammensetzung der Beachrockproben (Dünnschliffe) 34 b) Zementzusammensetzung der Beachrockproben (ESEM) 35
Tabelle 3:	Expositionstypen der Beachrockvorkommen 59
Tabelle 4:	Zusammenstellung der topographisch-morphologischen Geländedaten 66

Abbildungen

Abbildung 1:	Lage des Korallenarchipels der Malediven..... 12
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Reliefverhältnisse des zentralen 14 Bereichs der Malediven
Abbildung 3:	Schematischer Schnitt durch das Nord-Malé Atoll 16
Abbildung 4:	Tidekurven für Malé..... 17
Abbildung 5:	Mittlere jährliche Durchschnittstemperaturen für Malé (1970-2000)..... 18
Abbildung 6:	Mittlere jährliche Niederschläge für Malé (1970-2000)..... 18
Abbildung 7:	Schematisiertes Querprofil eines Riffdachs mit Insel 21
Abbildung 8:	Potentielle Lagen der Beachrockvorkommen im Nord-Malé Atoll 23
Abbildung 9:	Topographische Lage der Beachrock-Fundorte, Anzahl der 32 Vorkommen und Probenkennungen
Abbildung 10:	a) Zuordnung der Zementklassen zur Entnahmehöhe, den 34 Testgebieten und innerhalb einzelner Vorkommen (Dünnschliffe) b) Zuordnung der Zementklassen zur Entnahmehöhe und den 35 Testgebieten (ESEM) c) Zusammenfassende Zuordnung der Zementklassen zur 36 Entnahmehöhe und den Testgebieten (Dünnschliffe und ESEM)
Abbildung 11:	Chemische Zusammensetzung der Beachrock- und Sedimentproben 41
Abbildung 12:	Magnesiumgehalte der Beachrockproben nach Entnahmehöhe 43 und im Vergleich zu den jeweiligen Sedimentproben
Abbildung 13:	Korngrößenspektren der Beachrockvorkommen und Sedimente..... 46
Abbildung 14:	Korngrößen innerhalb des Beachrockvorkommen Rasfari 2..... 47

Abbildung 15: Korngrößen der Beachrockvorkommen aufgeschlüsselt nach Entnahmhöhen	47
Abbildung 16: Korngrößenspektren der Beachrockvorkommen in den Testgebieten.	49
Abbildung 17: Übersicht über bathymetrische und morphologische Verhältnisse in den Testgebieten	56
Abbildung 18: Expositionen der Beachrockvorkommen in Bezug auf die vorherrschenden Windverhältnisse	59
Abbildung 19: Topographische Lage der Inseln und Beachrockvorkommen	60
Abbildung 20: Darstellung der Gelände-Messpunkte	63
Abbildung 21: a) Größenverhältnisse der Beachrockvorkommen	63
b) Vertikale Erstreckungen der Beachrockvorkommen	64
c) Höhenlagen der Beachrockvorkommen	64
Abbildung 22: Lagetypen der Beachrockvorkommen.....	68
Abbildung 23: Formtypen der Beachrockvorkommen	69
Abbildung 24: Oberflächentypen der Beachrockvorkommen	70
Abbildung 25: Veränderung der Oberflächenmorphologie innerhalb des Beachrockvorkommens Olahali 2	71
Abbildung 26: Oberflächenformen der Beachrockvorkommen in den Testgebieten	72
Abbildung 27: Oberflächenformen ausgewählter Beachrockvorkommen in Bezug zum MSL	73
Abbildung 28: Klimatische Zuordnung der Beachrockzemente.....	84
Abbildung 29: Größenverhältnisse der Beachrockvorkommen im globalen Vergleich	85
Abbildung 30: Vertikale Erstreckung und Höhenlagen der Beachrockvorkommen im Bezug zum Tidenhub und mittleren Meeresspiegel	86
Abbildung 31: Profillinien der Vorkommen Rethiraa 2 und nach AMIEUX et al. (1989) im relativen Vergleich	87
Abbildung 32: Ausgewählte Kurven der holozänen Meeresspiegelveränderungen	91
Abbildung 33: Modell der supratidalen Beachrockgenese auf den Malediven.....	95
Abbildung 34: Beachrockvorkommen Helengeli 3 im Bezug zum spätholozänen und rezenten Meeresspiegel	97
Profilzusammenstellung 1: Beachrockvorkommen Testgebiet Nord, Inseln Olahali und Kagi	74
Profilzusammenstellung 2: Beachrockvorkommen Testgebiet Nord-Ost, Teil 1, Insel Helengeli und Fundort Alifinolu	75
Profilzusammenstellung 3: Beachrockvorkommen Testgebiet Nord-Ost, Teil 2, Fundort Winnikawandu	76
Profilzusammenstellung 4: Beachrockvorkommen Testgebiet Nord-Ost, Teil 3, Fundorte Winnikiawandu & Lately Rock	77
Profilzusammenstellung 5: Beachrockvorkommen Testgebiet Süd-Ost, Teil 1, Inseln Lohifushi und Lankanfushi	78

Profilzusammenstellung 6: Beachrockvorkommen Testgebiet Süd-Ost, Teil 2	79
Inseln Kanuhura und Monifinolu	
Profilzusammenstellung 7: Beachrockvorkommen Testgebiet West, Teil 1	80
Inseln Rethiraa, Hembadoo und Nakatchafushi, Fundort Sand	
Profilzusammenstellung 8: Beachrockvorkommen Testgebiet West, Teil 2	81
Insel Rasfari und Fundort Rasfari-Faro	

Bilder

Titelbild: Beachrockvorkommen auf der Insel Rasfari

Bild 1: Verhärtetes Sediment in der Oberfläche eines Korallenstocks	22
Bild 2: Einfach strukturiertes Beachrockvorkommen unter MSL.....	24
Bild 3: Komplexes Beachrockvorkommen im Niveau des MSL, mit Anzeichen	25
extremer mechanischer Zerstörung	
Bild 4: Bankartiges, den Inselkörper flankierendes Vorkommen im MSL	25
Bild 5: Dosenpegel.....	26
Bild 6: Detailaufnahme Probe Ola 3-4	44
Bild 7: Detailaufnahme Probe Mon 1b	44
Bild 8: Durchtrenntes Beachrockniveau.....	67
Bild 9: Verschmelzende und in Inselkern auslaufende Beachrocks	68
Bild 10: Beachrock als Akkumulationsbasis für Beachrocksedimente.....	96
Bild 11: Stranderosion an der Westseite der Insel Hembadoo	98
Tafel 1: Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie: Beachrockproben	37
Winnikawandu 1 und Alifinolu 1 & 2	
Tafel 2: Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie: Beachrockproben	38
Lately Rock, Lohifushi 5 und Hembadoo 1a	
Tafel 3: Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie: Beachrockproben	39
Hembadoo 1b und Rasfari 1 a & b	
Tafel 4: Detailaufnahmen Beachrockproben Insel Olahali.....	50
Tafel 5: Detailaufnahmen Beachrockproben Inseln Olahali, und Helengeli.....	51
Fundorte Lately Rock und Alifinolu	
Tafel 6: Detailaufnahmen Beachrockproben Fundort Winnikawandu.....	52
Tafel 7: Detailaufnahmen Beachrockproben Fundort Winnikawandu,.....	53
Inseln Lohifushi, Monifinolu und Lankanfushi	
Tafel 8: Detailaufnahmen Beachrockproben Inseln Kanuhura, Rethiraa und Rasfari	54
Tafel 9: Detailaufnahmen Beachrockproben Inseln Rasfari und Hembadoo,.....	55
Fundorte Rafsari-Faro und Sand	

1 Problemstellung und Zielsetzung

Problemstellung

Beachrock, in einer Kurzdefinition als „durch Kalziumkarbonatausfällungen in-situ verfestigtes Strandmaterial“ zu bezeichnen, ist ein zonales Phänomen, dessen Auftreten sich - mit vereinzelt Ausnahmen - auf tropische und subtropische Küstenräume beschränkt. Dabei sind die Beachrockvorkommen mit ihrem differenzierten morphologischen Erscheinungsbild überwiegend im Intertidalbereich der Strände zu finden, liegen jedoch auch unter der Niedrigwasserlinie bzw. über der Hochwasserlinie. Zudem zeigen die Vorkommen eine hohe Variabilität hinsichtlich ihrer Größendimensionen, in der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials und im inneren Aufbau mit unterschiedlichen Korngrößenspektren und Zementen.

Seit über 50 Jahren findet eine intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Phänomen Beachrock statt. Der Schwerpunkt der Forschung liegt bislang auf der chemischen und mineralogischen Analyse des Beachrocks. Angaben bzw. Auswertungen von Daten zu den topographischen und morphologischen Verhältnissen der Beachrockvorkommen sind oft nur marginal vorhanden oder fehlen ganz (siehe Tab. 1, S. 9ff). Es wurde versucht über Aufbau und Zusammensetzung, v. a. der Matrix, die Genese zu ergründen. Bis dato liegen jedoch keine einheitlichen Aussagen zu den Prozessen, die zur Verfestigung des Lockersedimentes führen, vor. Ebenso wenig herrscht Einigkeit bezüglich des Bildungsmilieus. Ein Großteil der Autoren geht von einer Genese im Intertidal aus, dabei je nach Lokalität ohne oder mit Beteiligung von Grundwasser. Ausgehend von der entsprechenden These findet Beachrock vermehrt Einsatz bei der Bestimmung holozäner Meeresspiegelstände und der Prognostizierung zukünftiger Meeresspiegelveränderungen.

Da die Mächtigkeiten bzw. die vertikalen Erstreckungen der Beachrockvorkommen nur selten mit dem jeweiligen Tidenhub übereinstimmen (was bei einer Genese im Intertidal eigentlich der Fall sein müsste), sondern zumeist deutlich darüber liegen, gilt es, nicht nur die Prozesse sondern vor allem auch das Bildungsmilieu genauer zu erfassen. Dies ist gerade für die Inselwelt der Malediven von entscheidender Bedeutung. Die heute vorzufindenden Beachrockvorkommen, welche zum Teil die Inseln völlig umschließen können, stellen zur Zeit nicht nur einen wichtigen Faktor für die Strandstabilität dar, sondern dürften auch einen entscheidenden Einfluss bei der Entstehung und Entwicklung der Inseln gehabt haben.

Um die Bedeutung des Beachrock sowohl für die Inselgenese und -dynamik als auch die zukünftige Wertigkeit der Beachrockvorkommen für die Inselstabilität (im Falle der Malediven), aber auch generell für den Küstenschutz, vor dem Hintergrund eines steigenden Meeresspiegels, abschätzen zu können ist die genaue Kenntnis von Prozessen und Milieu der Bildung erforderlich.

Da die bisherigen überwiegend chemischen und mineralogischen Ansätze, die bei der Genese beteiligten Prozesse und das Milieu zu ergründen, noch zu keinem eindeutigen Ergebnis führten, erscheint der Versuch sinnvoll, Beachrockvorkommen stärker nach topographisch-morphologischen Gesichtspunkten zu analysieren.

Zielsetzung

Zielsetzung der Arbeit ist es, (aus oben genannten Gründen) über einen topographisch-morphologischen Ansatz weitere Hinweise auf die bei der Beachrockbildung beteiligten Prozesse zu erlangen, und das Bildungsmilieu genauer einzugrenzen. Dazu wurden in vier Testgebieten im Nord-Malé Atoll der Malediven:

(1) alle sichtbaren Vorkommen sowie die entsprechenden Strände beprobt und hinsichtlich ihrer chemischen, mineralogischen und sedimentologischen Zusammensetzung analysiert, um den Vergleich mit Beachrocks anderer Lokalitäten und dem rezenten Strandmaterial zu ermöglichen.

(2) die topographisch-morphologischen Charakteristika erfasst und in Bezug zu den lokalen geomorphologischen und ozeanographischen Strukturen gesetzt, um im Vergleich mit den Ergebnissen vorhandener Arbeiten weitere Rückschlüsse auf Prozessdynamik und Bildungsmilieu zu erlangen.

Ausgehend von diesen Ergebnissen sollte dann

(3) die Bedeutung der Beachrockvorkommen für die Inselgenese und -dynamik sowie deren zukünftige Wertigkeit für die Stabilität der maledivischen Inselwelt erfasst werden.

2 Zum derzeitigen Stand der Beachrockforschung

Beachrock ist seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschung, ohne dass dabei von den Autoren der verschiedenen Fachdisziplinen einheitliche Aussagen über Geneseprozesse und -milieu vorliegen (siehe KELLETAT 1998). Der Grund dafür dürfte auch in der hohen Variabilität der Beachrockvorkommen liegen. Vergleicht man Arbeiten, die sich explizit mit einzelnen Vorkommen beschäftigen, hinsichtlich verschiedener relevanter Beachrock-Daten (vgl. Tab. 1., S. 9 ff), so zeigt sich die Schwierigkeit einer einheitlichen Charakterisierung des Phänomens Beachrock:

- die vertikalen Erstreckungen der Beachrockvorkommen liegen zwischen wenigen Zentimetern und 3,5 m (SPURGEON 2003). Ihre Längen schwanken dabei zwischen 3 m (KNEALE & VILES 2000) und 2,3 km (CALDAS 2002), die Breiten zwischen 1 m (eigene Erhebungen) und 150 m (SPURGEON 2003), wobei der Großteil im Breitenbereich zwischen 3 m und 20 m liegt. Die Lagen an den rezenten Stränden erstrecken sich von 3 m unter (SPURGEON 2003), bis 2,6 m (CALDAS 2002) über den mittleren Meeresspiegel. Dabei können die Fußlinien sowohl über als auch unter dem Tideniedrigwasser-Niveau, die Oberflächen gleichfalls über bzw. unter dem Tidehochwasser-Niveau liegen.
- sie sind überwiegend seewärts geneigt (Neigungen zwischen 2° (CALVET ET AL. 2003) und max. 20° (SCHIPULL 1988)), in einigen Fällen auch waagrecht gelagert. Ihr morphologischer Aufbau zeigt bis zu 15 einzelne Niveaus (MEYERS 1987) innerhalb eines Vorkommens, die zum Teil eine Schichtung hinsichtlich unterschiedlicher Korngrößen aufzeigen. Bezüglich der granulometrischen Beschaffenheit finden sich nur selten konkrete Angaben. PYÖKÄRI (1982) gibt 0,2 cm bis 3 cm, CALVET ET AL. (2003) Korngrößen bis 20 cm, SCOFFIN (1969) sogar bis 40 cm an. Nach den generellen Beschreibungen finden sich in den Beachrockvorkommen feinsandige bis kiesige (CHOWDHURY ET AL. 1997), jedoch niemals schluffige, (KELLETAT 1998) Körnungen. Oftmals wird angegeben, dass sowohl die sedimentologische, als auch die chemische Zusammensetzung dem rezenten Strandmaterial entspricht (ALEXANDERSSON 1972, SCHILLINGS 1994 u. a.).
- liegen zu Überformungsanzeichen Angaben vor, so zeigt sich durchwegs physikalische Überformung im Sinne mechanischer Zerstörung und abrasiven Überschleifens, zum Teil auch bioerosive, seltener chemische Überformung.

- der Ursprung des Ausgangsmaterials kann sowohl silikatisch, karbonatisch als auch vulkanisch sein, bzw. als Gemisch vorliegen. Biogene marine Anteile (die Zemente/Matrix ausgenommen) sind, mit Ausnahme eines Beachrockvorkommens auf den Kanaren (CALVET ET AL. 2003), in verschiedenen Größenordnungen beigemischt.
- die Matrix setzt sich generell aus Aragonit, Calcit und Hoch-Mg-Calcit zusammen. Dabei erscheinen je nach Lokalität die unterschiedlichsten Zementkombinationen: neben Vorkommen deren Matrix alle drei Varianten des Calciumkarbonates enthalten, finden sich auch solche bei denen nur eine bzw. eine Kombination aus zwei Varianten als Zemente auftreten.
- die Altersangaben für holozäne Beachrockvorkommen schwanken zwischen 239 und 6265 Jahren B.P. Anzeichen dafür, dass Altersangaben mit Vorsicht zu behandeln sind, finden sich z.B. bei STRASSER ET AL. (1988) die für ein mehrschichtiges Beachrockvorkommen in SE-Tunesien 3.340 bis 4.370 B.P. angeben, wobei die oberen Lagen die älteren sind, oder bei FRIEDMANN ET AL. (1971), bei deren Analyse eines submarinen Vorkommens die Muschelschalen ein mittleres Alter von 4.390 B.P. vorwiesen, der Zement jedoch auf 15.600 B.P. datiert wurde. Eine wohl verlässlichere Möglichkeit zur Festlegung der Zeit der Zementierung bieten Artefakte wie Tonscherben, Metallgegenstände, oder Glasflaschen. Diese sollten jedoch zum einen „frisch“ sein, also keine größere Verweildauer in der Brandungszone bzw. dem Vorstrand gehabt haben, zum anderen sich tatsächlich im Beachrock befinden (z.B. Scherben von Bierflaschen in der Matrix, SCOFFIN 1970) und nicht nur oberflächlich angebacken sein (siehe auch Kap. 3.3.1).

Als Zeitspanne der Sedimentverfestigung kann man - oberflächliche Artefakte deren Anbackung nachweislich in Jahresfrist erfolgen kann (z.B. Patronenhülsen nach EMERY ET AL. 1954, aus SCOFFIN & STODDART 1983) ausgenommen - Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte annehmen (KELLETTAT 1998, u. a.). Allerdings wird in dem viel zitierten Bericht von MORESBY (1835) angegeben, dass die Bewohner der Malediven Beachrock als Baumaterial abgebaut hätten, und sich an gleicher Stelle innerhalb eines Jahres neuer Beachrock bildete.

Vor der Beschreibung der gegenwärtigen Thesen zu Prozessen und Milieu der Beachrockgenese sollen im Folgenden kurz die Faktoren und Mechanismen der Sedimentzementierung dargestellt werden.

Der grundlegende Prozess der zur Sedimentzementierung führen kann, ist die Abscheidung von Calciumkarbonat aus dem mit Calciumhydrogenkarbonat bis zu 4-fach übersättigtem (FÜCHTBAUER 1988) Oberflächenwasser der Meere. Die Faktoren, die zu dieser anorganischen Kalkabscheidung führen können sind nach SEIM & TISCHENDORF (1990) Temperaturerhöhung, Abnahme des CO_2 -Partialdrucks oder Erhöhung des pH-Wertes durch z. B. bakterielle Stoffwechselprodukte (FÜCHTBAUER 1988). Die Kristallisation des Kalziumkarbonates erfolgt dabei in den warmen tropischen und subtropischen Oberflächenwässern bevorzugt als Aragonit, aber auch Hoch-Magnesium-Calcit (BATHURST 1976, GIVEN & WILKINSON 1985, HOLAIL & RASHED 1991) oder in kühleren Regionen und tieferen Wasserschichten sowie unter Einfluss von meteorischem Grundwasser als (Nieder-Magnesium-)Calcit ($<5\text{mol}\%\text{MgCO}_3$) (BATHURST 1976, HANOR 1978). Des weitern kann Calcit durch die Transformation von Aragonit/Hoch-Magnesium-Calcit gebildet werden. BATHURST (1976) unterscheidet dabei die „trockene“ Transformation, die jedoch innerhalb geologischer Zeiträume abläuft und die „nasse“ Transformation unter Wassereinfluss (ohne freies Mg^{2+}), welche bei 23°C bereits nach ca. 100 Tagen eine komplette Umwandlung bewirken kann.

Generell werden vier Mechanismen unterschieden die (auch im Zusammenwirken) zur Sedimentzementierung führen können:

- (1) Ausfällung durch Verdunstung von Meerwasser. Die Verdunstung von in die Porenräume eingedrungenem Meerwasser führt zu einer Erhöhung der Ionenkonzentration und folglich zur Ausfällung von Kalziumkarbonatzement und kann somit die Verkittung des Sedimentes herbeiführen (GINSBURG 1953, SCOFFIN & STODDART 1983). Wirksam ist dieser Mechanismus in der Wellenauflauf- / Spritzwasserzone und im Intertidal bei Niedrigwasser.
- (2) Ausfällung durch Mischung von meteorischem Wasser mit Meerwasser. Die Calciumkarbonatausfällung wird einerseits durch die Temperaturerhöhung beim Auftreffen karbonatgesättigtem, relativ kaltem Grundwassers auf das relativ wärmere Meerwasser - im Grenzbereich zwischen meteorisch phreatischer und marin phreatischer Zone - verursacht. SCHILLINGS (1994) zeigt eine um 15% verminderte Calcitlöslichkeit meteorischen Grundwassers bei einer Temperaturerhöhung von 15°C auf 25°C . Andererseits bedingen die unterschiedlichen chemischen Zusammen-

setzungen eine Verschiebung des CO₂-Partialdrucks und des pH-Wertes, was auf eine Karbonatausfällung fördernd wirkt (SCHILLINGS 1994, REY ET AL. 2004).

- (3) Ausfällung durch CO₂-Entgasung infolge von Wellenbewegung und Temperaturerhöhung. Die Karbonatausfällung geschieht in diesem Fall durch die Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts des oberflächlichen Meerwassers. Zum einen durch die Erwärmung von in die Porenräume des Strandsediments eingedrunenem Wasser, zum anderen durch den Kontakt des Meerwassers mit der Atmosphäre an der Sediment-Atmosphären-Grenze, verursacht durch Brandung und gezeitenbedingte Wasserstandsschwankungen (HANOR 1978, MEYERS 1987, SCHILLINGS 1994, GISCHLER & LOMANDO 1997).
- (4) Zementierung durch den direkten oder indirekten Einfluss biologischer Aktivitäten. Die Bereitstellung von Zementmaterial erfolgt durch die Ausscheidungen verschiedener sedimentkonsumierender Organismen wie Bohrwürmer und Schnecken sowie durch Karbonatausfällung bei CO₂ Entzug während Photosyntheseaktivitäten und pH Veränderung durch Denitrifikation bei der Stoffwechselfätigkeit anaerober Bakterien. Des weiteren kann durch Algenmatten einerseits direkt Magnesiumcalcit abgeschieden werden, andererseits die oberste Sedimentschicht fixiert werden. (TAYLOR & ILLING 1969, DAVIES & KINSEY 1973, JONES 1987, WEBB et al.1999)

Ausgehend von den jeweiligen Lokalitäten und den jeweils zu Grunde gelegten Mechanismen (siehe oben) entstanden mehrere Thesen zu Prozessen und zum Milieu der Beachrockgenese, welche im Folgenden dargestellt werden.

Ein Großteil der Autoren (GINSBURG 1953, HANOR 1978, SCHILLINGS 1994, WEBB ET AL 1999, u. a.) sieht die Genese des Beachrocks gebunden an das Intertidal. Obgleich eine submarine Sedimentzementierung generell möglich erscheint, (BRICKER 1971, FRIEDMANN ET AL. 1971) wird nicht von einer submarinen Beachrockgenese ausgegangen. MOORE (1973) hält eine Zementierung vom Intertidal ins Subtidal für möglich: "Beach rock cementation...occurs in the intertidal zone and extends a considerable distance below mean low tide, indicating that beach rock cementation probably merges seaward with submarine cemented hardgrounds" (MOORE 1973, S. 601).

Nur wenige Autoren sehen zur Zeit das Supratidal als Milieu der Beachrockgenese, obgleich bereits RUSSEL (1962) auf eine Bildung bis zu 2 m über dem Meeresspiegel hinwies und auch KELLETAT (1975) eindeutige Belege dafür fand. Bei der supratidalen Genese erfolgt die Karbonatausfällung und Zementierung durch Evaporation von

Meerwasser, welches durch das Auslaufen der Wellen und Spritzwasser in den Sedimentkörper eingebracht wird. Neben KELLETAT (1998), der in einer supratidalen Genese die einzige Erklärungsmöglichkeit für das differenzierte Erscheinungsbild der Beachrockvorkommen sieht, hält auch COOPER (1991) das Supratidal als Bildungsmilieu für möglich. Weitere Hinweise finden sich bei TIETZ & MÜLLER (1971), CHOWDHURY ET AL. (1995) sowie bei GISCHLER & LOMANDO (1997, S. 294), die für Vorkommen in Belize feststellten, dass „...radiocarbon dates suggest that sea level was 0,5-1,5 m lower during beachrock formation than today“.

Bei den Vertretern der „Intertidal-These“ zeigen sich unterschiedliche Ansichten bezüglich der Mechanismen und des Ablaufes der Beachrockgenese. Es können zwei grundlegende Theorien unterschieden werden.

Zum einen die Intertidalgenese mit Grundwassereinfluss, bei der die Zementierung durch Ausfällung beim Aufeinandertreffen meteorischen Grundwassers mit Meerwasser in der phreatischen Zone erfolgt (SCHMALZ 1971, STRASSER et al. 1988, AMIEUX ET AL. 1989, SPURGEON ET AL. 2003).

Zum anderen die Intertidalgenese ohne Grundwassereinfluss, bei der die Zementierung durch Evaporation/Ausfällung während Niedrigwasser und/oder CO₂-Entgasung erfolgt (GINSBURG 1953, PYÖKÄRI 1982, MEYERS 1987, WEBB ET AL. 1999).

Darüber hinaus finden sich auch „Mischthesen“ (BEIER 1985, CALVET ET AL. 2003, u. a.) bei denen die Autoren die Beachrockgenese als mehrphasigen Vorgang sehen. Mittels dieser Mischthesen wird versucht, das Auftreten verschiedener Zementarten - welche wiederum bestimmten Milieuverhältnissen zugeordnet werden (siehe oben) - innerhalb eines Beachrock zu erklären. So gehen z. B. REY ET AL. (2004) von einer initialen Zementierung unter der Sedimentoberfläche mit Grundwassereinfluss aus. Durch Stranddegradation wird der Beachrock freigelegt, erosiv überformt und durchläuft einen Aushärtungsprozess unter marinen Bedingungen. Bei erneuter Akkumulation wird er wieder in seine Lage unter dem Sediment gebracht. Eine weitere mehrphasige Genese vertreten CHOWDHURY ET AL. (1995). Sie gehen für Beachrockvorkommen in Bangladesh davon aus, dass Beachrockbildung in der unteren intertidalen Zone beginnt. Ein sinkender Meeresspiegel „hebt“ den Beachrock in eine obere intertidale Zone, in welcher er im Kontakt zum Grundwasserspiegel steht. Ein erneutes Absinken des Meeresspiegels legt den Beachrock in eine supratidale Lage.

Ein weiterer Geneseansatz geht, unabhängig vom Bildungsmilieu, auf den Einfluss von Mikroorganismen zurück. HILLGÄRTNER ET AL. (2001) vertreten die Ansicht, dass durch Stoffwechselfvorgänge ausgelöste Karbonatausfällungen eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung und Zementierung von Karbonatsanden einnehmen. Dabei spielen neben Pilzen, heterotrophen Bakterien und Flechten vor allem Blaualgen eine entscheidende Rolle. Auch SCHREIBER ET AL. (2002), die die Photosyntheseaktivität von Blau- und Grünalgenmatten auf Beachrockvorkommen untersuchten, sehen einen möglichen initialen Einfluss mikrobiologischer Aktivität auf die Beachrockbildung.

Ebenso kommt NEUMEIER (1999, S. 35) bei seinem Laborexperiment zu dem Schluss, dass „... the first micritic cement, which seems to control cementation and produce the initial consolidation, is formed under a strong microbial influence in or near a biofilm covering the grain surface“. Auch BEIER (1987) vermutet in der Photosyntheseaktivität von in und auf dem Sediment lebender, Algen einen potentiellen Beitrag zur Karbonatausfällung. Dagegen sehen DAVIES & KINSEY (1973) nur einen stabilisierenden Effekt von Algenmatten auf die oberste Sedimentschicht, weisen ihnen jedoch keinen Einfluss auf die eigentliche Sedimentzementierung zu.

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Arbeiten hinsichtlich relevanter Beachrock-Charakteristika - Teil 1

Autor		Ginsburg (1953)	Russel (1962)	Taylor & I. (1969)	Scoffin (1969)	Tietz & Müller (1971)	Schmalz (1971)	Alexandersson (1972/1969)	Davies & K. (1973)	Moore (1973)	Kelletat (1975)
Lokalität	Vorkommen	Loggerhead Key, S-Florida	Karibik, Hawaii Mittelmeerregion	Ras Rakan, N-Küste Qatar Persischer Golf	W-Küste Insel Bimini Bahamas	Fuerteventura. Kanaren	Eniwetok Atoll, Marschall Inseln Süd Pazifik	nördliche Mittelmeerküsten, Marocco	S-Heron Island S-Spitze Great Barrier Reef	Insel Grand Cayman; West Indies, Karibik	Peloponnes, Griechenland
	Proben	2 k.a.	60 k.a.	1 k.a.	k.a. k.a.	6 6	3 6	5 k.a.	1 13	9 26	12 12
Topo- graphie	Mächtigkeit	bis 2,4m	k.a.	bis ca. 1,5m	0,1 - 1,0m	0,1-0,3m	k.a.	k.a.	ca. 1,5 m	k.a.	0,9 - 2,7m
	Länge	k.a.	k.a.	k.a.	ca. 100m	k.a.	k.a.	k.a.	ca.450m	k.a.	20 - >200m
	Breite	k.a.	k.a.	k.a.	10 - 20m	k.a.	k.a.	k.a.	ca. 20m	k.a.	1 - 15m
	Lage zum MSL	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	-2,2 /+ ca. 2m
Morphologie	Neigung	s, <10°	s	k.a.	s,	k.a.	k.a.	s	s	s	s
	Niveaus	x	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	x	k.a.	k.a.	x
	Schichtung	x	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
	Korngrößen	k.a.	k.a.	k.a.	bis ca. 40cm	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
	Überformung	b,p	b,p	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	b,p	p	k.a.
Ausgangs- material	silikatisch		x					x			
	karbonatisch	x	x	k.a.	x	x	x	x	x	x	k.a.
	vulkanisch		x			x					
	gemischt		x			k/v		x			
	biogene marine Anteile (≠ Matrix)	x	x	k.a.	x	x	x	x	x	x	k.a.
Matrix	Aragonit	x	(x)	x	x	x	x		x	x	
	Calcit	(x)	x	x		x			(x)		k.a.
	Hoch-Mg Calcit			x		x	x	x		x	
Alter	(Mittelwerte in Jahren B.P.; con- ventional age)	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	ca. 4000 bis 5000
These zum Bildungsmilieu	subtidal									(x)	
	intertidal	x	x	k.a.	k.a.	x	x	k.a.	k.a.	x	
	supratidal		(x)			(x)					x
	grundwasser- beeinflusst mikrobiologische Aktivität		x				x		(x)	x	
sonstiges			Lockersediment zwischen Niveaus; einzelne Lagen ca. 10cm stark		sedimentäre Zusammensetzung wie rezentes Strandmaterial		sedimentäre Zusammensetzung ähnlich wie rezentes Strandmaterial	Zunahme des Aragonitanteils am Porenvolumen mit der Tiefe;	Zementierung bis unter Niedrig- wasserlinie		BR spiegelt Auf- schüttungsformen wieder (z.B. Strand- wälle, Tomboli)

Erläuterungen:

Mächtigkeit: hier im Sinne einer vertikalen Erstreckung zu sehen; Neigung: s = seewärts, w = waagrecht; Überformung: b = bioerosiv, c = chemisch, m = mechanische Zerstörung, Abrasion

() = gering/selten; k.a. = keine Angaben; Schichtung = sedimentologische Unterschiede zwischen den Niveaus

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Arbeiten hinsichtlich relevanter Beachrock-Charakteristika - Teil 2

Autor		Moore (1977)	Hanor (1978)	Pyökäri (1982)	Beier (1985)	Meyers (1987)	El Sayed (1988)	Schipull (1988)	Amieux et al. (1989)	Whittle et al. (1993)	Kindler & B. (1993)
Lokalität	Vorkommen	W-Bolier Bay, Insel St. Croix, Jungferinseln	Bolier Bay, Insel St. Croix, Jungferinseln	Pattaya, E- Küste Golf v. Siam, SE Thailand	Insel San Salvador Bahamas	Hooika Park, N-Mauai, Hawaii	Mittelmeer- küste, Alexandria, Ägypten	Südküste Teneriffa Kanarische Inseln	nordöstlich Lomé, Bucht von Benin, Togo	Lee Stocking Island, Bahamas	Insel San Salvador Bahamas
	Proben	1 k.a.	1 k.a.	2 1	4 10	1 15	k.a. k.a.	3 k.a.	4 k.a.	8 24	1 4
Topo- graphie	Mächtigkeit	0,4-0,9m	k.a.	0,3-0,4m	0,4-05m	1,5m	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
	Länge	k.a.	k.a.	15m	k.a.	380m	k.a.	ca. 300m	k.a.	k.a.	>500m
	Breite	k.a.	k.a.	3-6m	k.a.	ca. 5m	k.a.	10-20m	k.a.	k.a.	k.a.
	Lage zum MSL	k.a.	k.a.	-20/+20cm	k.a.	ca. -50/+100cm	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
Morphologie	Neigung	s	k.a.	s, 8-9°	s, 5-10°	s, 5°	k.a.	s, bis 20°	k.a.	k.a.	s, 8-10°
	Niveaus	k.a.	k.a.	1	k.a.	15	k.a.	x	k.a.	k.a.	x
	Schichtung	k.a.	k.a.	-	k.a.	k.a.	k.a.	x	k.a.	k.a.	k.a.
	Korngrößen	k.a.	k.a.	0,2 - 3cm	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
	Überformung	k.a.	k.a.	b,c,p	b,(c),p	k.a.	k.a.	b,p	p	k.a.	p
Ausgangs- material	silikatisch			x					x		x
	karbonatisch	x	x		x			x		x	x
	vulkanisch					k/(v)	k/s				
	gemischt biogene marine Anteile (≠ Matrix)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Matrix	Aragonit	x	x	x	x	(x)	x		(x)	x	x
	Calcit		x	x	x	(x)	(x)	k.a.	x	(x)	x
	Hoch-Mg Calcit	x	x	x		x	x		x	x	
Alter (Mittelwerte in Jahren B.P.; con- ventional age)		k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	810 bis 1220
	These zum Bildungsmilieu	subtidal (x) intertidal x supratidal grundwasser- beeinflusst mikrobiologische Aktivität x	x x	x k.a.	(x) x (x)	x k.a.	x k.a.	x k.a.	x k.a.	x k.a.	x
sonstiges		Abnahme des Ara- gonitanteils inner- halb BR-Vork. von E nach W		aus Strandsediment selbst entstanden	jüngerer Beachrock Aragonit, älterer Beachrock Calcit		sedimentäre Zusammensetzung wie rezentes Strandmaterial	Zementierungs- prozess ohne Grundwasser- beteiligung	Bildung unter Sedimentbe- deckung; später Freilegung		sedimentäre Zusammensetzung wie rezentes Strandmaterial

Erläuterungen:

Mächtigkeit: hier im Sinne einer vertikalen Erstreckung zu sehen; Neigung: s = seewärts, w = waagrecht; Überformung: b = bioerosiv, c = chemisch, m = mechanische Zerstörung, Abrasion

() = gering/selten; k.a. = keine Angaben; Schichtung = sedimentologische Unterschiede zwischen den Niveaus

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Arbeiten hinsichtlich relevanter Beachrock-Charakteristika - Teil 3

Autor		Schillings (1994)	Chowdhury (1997)	Gischler & L. (1997)	Strasser et al. (1998)	Webb et al. (1999)	Kneale & V. (2000)	Caldas (2002)	Calvet et al. (2003)	Spurgeon & (2003)	Rey et al. (2004)
Lokalität	Vorkommen Proben	Griechisches Festland, Inseln Euböa und Kreta 31 30	Insel St. Martin, Golf von Bengalen k.a. 5	E-Küste Belize und vorgelagerte Inseln 21 63	Bahiret el Biban, SE Tunesien nahe Zarzis 2 3	S-Heron Island, S-Spitze Great Barrier Reef 1 k.a.	Traigh Ear, Nord Uist, Äussere Hebriden 1 k.a.	Rio Grande do Norte Küste, NE-Brasilien 9 13	SW-Küste, La Palma, Kanaren 4 k.a.	Siesta Key, W-Küste Florida 1 18	Currobedo Bucht, Galizien NW-Spanien 2 k.a.
Topographie	Mächtigkeit Länge Breite Lage zum MSL	ca. 0,7m ca. 150m ca. 40m k.a.	bis 1m k.a. k.a. k.a.	k.a. k.a. bis 50m k.a.	ca. 0,5m k.a. k.a. k.a.	k.a. k.a. ca. 20m k.a.	ca. 0,03m ca. 3m ca. 3m k.a.	0,4 - 2m bis 2,3km 3-17m k.a./bis +2,6m	1 - 1,5m 50-200m 10-20m ca. -50/+50cm	ca. 3,5m ca. 1km bis 150m ca. -300/+75cm	k.a. ca. 100m 8-10m k.a.
Morphologie	Neigung Niveaus Schichtung Korngrößen Überformung	k.a. k.a. k.a. k.a. p	s, 5-15° k.a. k.a. k.a. p	s, < 10° x x k.a. k.a.	w 6 k.a. k.a. k.a.	s, 4-16° x x k.a. b,p	k.a. k.a. k.a. k.a. k.a.	s, <8° k.a. k.a. k.a. k.a.	s, 2-15° 1-2 x bis 20cm k.a.	s, ca. 12° k.a. k.a. k.a. p	w k.a. k.a. k.a. p
Ausgangsmaterial	silikatisch karbonatisch vulkanisch gemischt biogene marine Anteile (≠ Matrix)	 s/k (x)	 k.a. k.a.	x x k.a.	x x k.a.	x x k.a.	x x k.a.	x x k.a.	x k/(s) x	 k/(s) x	 s/k x
Matrix	Aragonit Calcit Hoch-Mg Calcit	x x x	x x x	x x x	x (x) (x)	x (x) x	(x) (x) x	x x	x x	 x (x)	 x
Alter	(Mittelwerte in Jahren B.P.; conventional age)	k.a.	k.a.	1050 bis 1910	3340 bis 4370	k.a.	k.a.	2180 bis 6265	239 bis 33330	1880 bis 4300	k.a.
These zum Bildungsmilieu	subtidal intertidal supratidal grundwasserbeeinflusst mikrobiologische Aktivität	 x x	 x x	 x (x) x	 x x	 x x	 x (x) (x)	 x (x)	 x x	 x x	 x x k.a.
sonstiges		sedimentäre Zusammensetzung wie rezentes Strandmaterial		sedimentäre Zusammensetzung wie rezentes Strandmaterial	Lockersediment zwischen Niveaus; aus Strandsediment aufgebaut	sedimentäre Zusammensetzung wie rezentes Strandmaterial	Sandkörner im Strand oftmals mit Ca-reichem Zement umhüllt	sedimentäre Zusammensetzung wie rezentes Strandmaterial			Bildung unter Sedimentbedeckung; später Freilegung

Erläuterungen:

Mächtigkeit: hier im Sinne einer vertikalen Erstreckung zu sehen; Neigung: s = seewärts, w = waagrecht; Überformung: b = bioerosiv, c = chemisch, m = mechanische Zerstörung, Abrasion

() = gering/selten; k.a. = keine Angaben; Schichtung = sedimentologische Unterschiede zwischen den Niveaus

3 Charakteristika des Korallenarchipels der Malediven unter besonderer Berücksichtigung des Nord-Malé Atolls

3.1 Allgemeine Beschreibung

3.1.1 Sozio-ökonomische Strukturen

Der südwestlich Indiens gelegene Korallenarchipel der Malediven ($07^{\circ}06'N$ bis $00^{\circ}45'S$ & $72^{\circ}33'$ bis $73^{\circ}45'E$) besitzt mit einer Gesamtfläche von ca. 90.000 km² nur 298 km² Landfläche. Auf den 199 bewohnten von insgesamt 1.192 Inseln lebten 2001 275.975 Menschen, wobei ca. ein Drittel der Inseln weniger als 500 Einwohner pro Insel beherbergt. Über ein Viertel der Bevölkerung lebt in der Hauptstadt Malé, die sämtliche übergeordneten Versorgungsfunktionen erfüllt (Regierungssitz, Zollhafen, Handels- und Verwaltungszentrum etc.). Bei einem relativ konstanten Bevölkerungswachstum von ca. 2% dürfte Ende 2005 die Bevölkerung der Malediven 300.000 Menschen erreicht haben (MINISTRY OF FISHERIES, AGRICULTURE & MARINE RESOURCES 2003).

Bezüglich der Besiedelung der Malediven finden sich nur wage Angaben. RASHAD, A.H. (2004) (Historiker, Malé, Internetreport) geht in seinem kurzen Überblick über die Geschichte der Malediven von einer ersten Besiedelung um 2000 v. Chr. aus. Historisch abgesichert (Internetreport, GEYER, G. 2005) erscheint eine Besiedelung um 500 v. Chr.

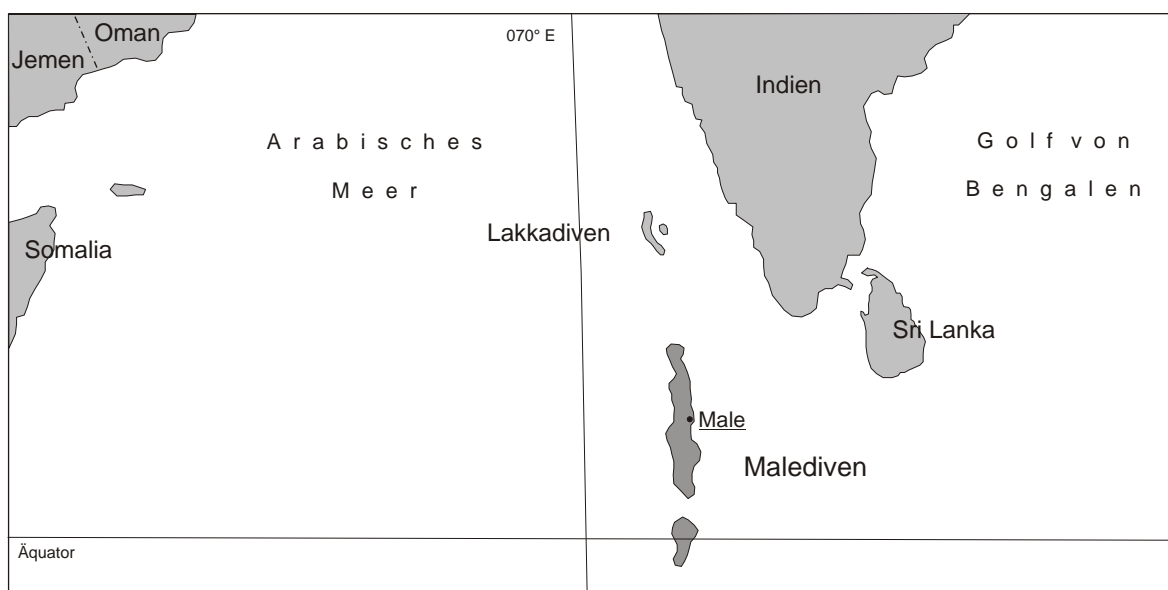


Abbildung 1: Lage des Korallenarchipels der Malediven

Hauptstandbeine der Wirtschaft sind der Fischfang, die Textilverarbeitung, Land- und Forstwirtschaft und allem voran der Tourismus. Gab es 1973 gerade einmal zwei so genannte „Holiday Resorts“, stieg die Zahl bis 1994 auf 73 an (MPE 1995). Zur Zeit stehen 87 Inseln (MTPB 2005) für den Tourismus bereit, 28 allein im Nord-Malé Atoll. Die Einnahmen aus der Tourismusindustrie, die nach der Korallenbleiche 1998 einen kleinen Einbruch erlitt, lagen 2002 wieder bei ca. 33,5% des Bruttonationalprodukts (BSP). Die Fischindustrie, im speziellen der Export von Trockenfisch, erlangte einen Anteil von 6,1% (2000) am BSP. Die Landwirtschaft (im wesentlichen Kokosnuss und Nebenprodukte der Kokospalme) sowie die Holzindustrie haben einen Anteil von 2,8% am BSP (2000) (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMM 2002).

Der Hauptenergieträger für die Inseln ist Diesel, der zur Stromerzeugung und als Kraftstoff für die Bootsmotoren dient. In den Haushalten finden überwiegend Kerosin, sowie Flüssiggas und Holz Verwendung. Der Einsatz von Photovoltaikzellen, Wasser- oder Windkraftanlagen spielt in der Energieversorgung keine nennenswerte Rolle.

Eines der größten Probleme auf den Inseln, sowohl in Malé, als auch auf den bewohnten und touristisch genutzten Inseln, stellt die Frischwasserversorgung dar. Die ursprünglich vorhandenen Frischwasserlinsen (im Lockersedimentkörper bzw. in Klüften im Korallensockel der größeren Inseln angesammeltes Niederschlagswasser), die ohnehin nur eine Mächtigkeit von wenigen Metern aufweisen, sind durch zu große Entnahmen entweder gänzlich aufgebraucht, durch eindringendes Meerwasser verbracktet, oder durch einsickerndes Abwasser völlig unbrauchbar. So ist die Süßwasserlinse auf der Insel Malé von ca. 30 m Mächtigkeit 1970 auf weniger als 1 m 2001 geschrumpft und durch das Zusammenspiel der erwähnten Vorgänge nicht mehr benutzbar (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMM 2002). Gelöst wird das Problem durch Meerwasserentsalzungsanlagen (für kleinere, nicht touristisch genutzte Inseln oft zu teuer) und das Sammeln von Regenwasser.

3.1.2 Geologische und geomorphologische Verhältnisse

3.1.2.1 Geologische Grundstrukturen

Die 26 geographischen Atolle (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMM 2002) des zwischen 80 km und 120 km breiten und ca. 860 km langen Korallenarchipel der Malediven bilden den mittleren Bereich des Lakkadiven-Chagos-Rücken. Die Basis des, als

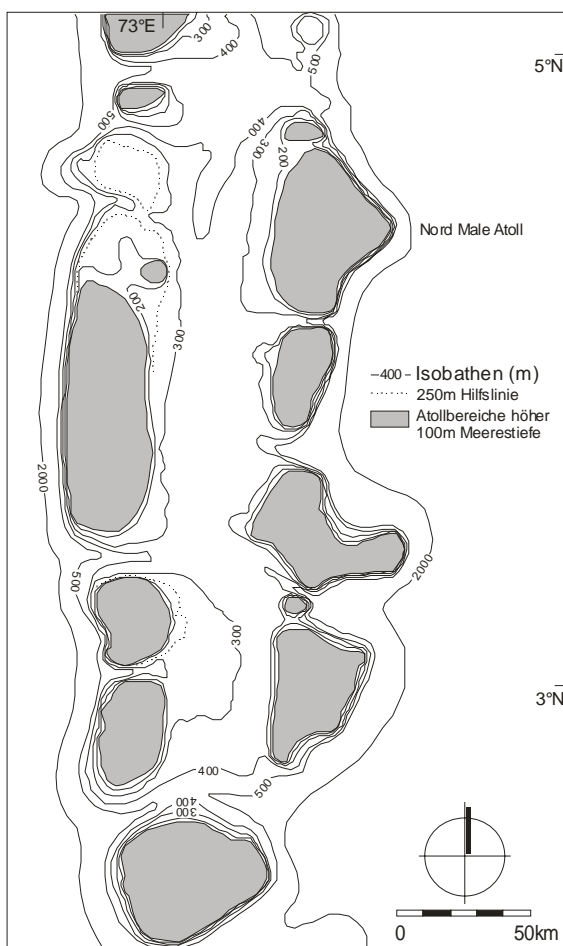


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Reliefverhältnisse des zentralen Bereichs der Malediven (nach PURDY & BERTRAM 1993)

tektonisch stabil geltenden Archipels (AVRAHAM & BUNCE 1977) bilden eozäne Basalte, die von ca. 1.700m mächtigen eozänen, oligozänen und miozänen Karbonaten überlagert werden. Den Abschluss bilden ca. 250 m mächtige plio-pleistozäne Kalke (PURDY & BERTRAM 1991). Der eozän-oligozäne Karbonatsockel war durch das Absinken des Meeresspiegels im mittleren Oligozän der Erosion/Verkarstung ausgesetzt. Mit dem Anstieg des Meeresspiegels im späten Oligozän fand eine erneute Riffbildung, verbunden mit dem Anwachsen des Riffsockels statt (PURDY & BERTRAM 1993, AUBERT & DROXLER 1992). Dieses Wechselspiel, welches sich durch die Meeresspiegelveränderungen im Pleistozän mehrfach wiederholt hat, führte zur Ausbildung des heutigen submarinen Reliefs.

3.1.2.2 Atollgenese

Auf den herauspräparierten Korallensockeln fand mit dem Anstieg des Meeresspiegels zu Beginn des Pleistozäns eine erneute Besiedelung, verbunden mit horizontalem wie vertikalem Riffwachstum statt. Dieses wurde durch die eustatischen Meeresspiegelschwankungen während der pleistozänen Vereisung mehrfach unterbrochen. Verkarstungs-, Erosions- und Sedimentationsvorgänge während der Meeresspiegeltiefstände

und wiederholte Neubesiedelung führten zur Ausprägung der einzelnen Atolle und zu deren morphologischen Differenzierung (vgl. PREU & ENGELBRECHT 1992).

In wie weit das Riffwachstum mit dem letztglazialen Meeresspiegelanstieg mithalten konnte, also nach dem „Meeresspiegelstillstand“ zumindest an den Atollrändern kein nennenswertes vertikales Wachstum mehr stattfand, bleibt fraglich. WOODROFFE ET AL. (1988) gehen davon aus, dass sich zumindest die oberen 10 m der Riffe in den letzten 10.000 Jahren gebildet haben. PREU & ENGELBRECHT (1993) schreiben, dass vertikales Riffwachstum erst ab ca. 6.000 B.P. einsetzte. Radiocarbonatierungen von WOODROFFE (1992) weisen darauf hin, dass die Riffe ca. 3.000 BP. ein Niveau erreicht hatten, das in etwa dem heutigen mittleren Meeresspiegel entspricht und somit ab diesem Zeitpunkt erst eine Inselgenese möglich war. Eine neuere Arbeit von KENCH ET AL. (2005) postulieren, dass die Inselbildung ca. 5.500 BP. – bei einem gegenüber dem rezenten MSL, um bis zu 2,5m tiefer gelegenen Riffdach – begonnen hat und bereits 4000 B.P., die generelle Anlage der Inseln betreffend, abgeschlossen war.

3.1.2.3 Atollmorphologie

Die morphologischen Strukturen, die sich als Folge der Prozesse in der jüngeren Vergangenheit ergeben haben, sollen anhand des Nord-Malé Atolls kurz dargestellt werden. Das Nord-Malé Atoll fällt nach Osten steil in die über 3000 m tiefe Lakkadiven See, im Westen in die 350 m tiefe „Inner Sea“ (PURDY & BERTRAM 1993) bzw. Kashidoo Kanal (PREU & ENGELBRECHT 1993) ab. Nach Süden und Norden wird das Atoll durch jeweils ca. 400 m bzw. 200 m tiefe Kanäle von den Nachbar-Atollen getrennt. Die einzelnen, den Atollrand bildenden Riffstrukturen sind durch 100 m bis zu einem Kilometer breite und 20 m bis 60 m tiefe Kanäle voneinander getrennt. Der Boden der Atoll-Lagune weist dabei eine Tiefe von maximal 69m auf (PREU & ENGELBRECHT 1993).

Die einzelnen Riffstrukturen können wie folgt gegliedert werden:

- (1) Faro: geschlossener Riffring mit eigener, im Mittel 5-20 m (max. 32 m) tiefen Lagune, dessen Riffdachflächen an der dem Außenriff zugewandten Seite (bei Atollrandlage) bei Niedrigwasser trocken fallen; kann Inseln beherbergen.
- (2) Pseudo-Faro: wie ein Faro, jedoch ohne ausgeprägte Lagune.
- (3) Sockelriff: vom Atollboden aufsteigendes, bis an die Wasseroberfläche reichendes Riff, dessen Dachfläche quasi geschlossenen Korallenbewuchs aufweist; kann eine Insel beherbergen.

- (4) **Fleckenriff**: wie ein Sockelriff, jedoch meist ringförmig aufgebaut; im Zentrum mit Sedimentablagerungen, ohne geschlossenen Korallenbewuchs; von EIBL-EIBESFELD (1982) als Miniatur-Atoll bezeichnet; Abgrenzung zum Faro: Riffdach auch bei Niedrigwasser nicht trocken fallend, ohne Insel.
- (5) **Tila**: kleiner, „Riffpfeiler“ (nach DAVIES ET AL. 1971 „lagoon reef knoll“), dessen Dachfläche meist zwischen 2 m und 5 m unter dem mittleren Meeresspiegel liegt.

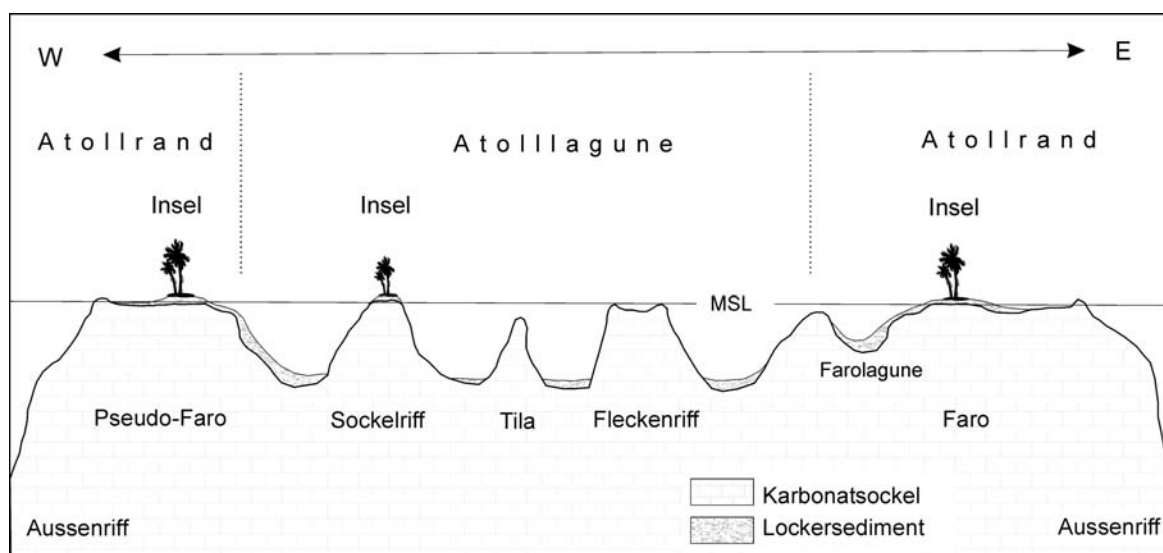


Abbildung 3: Schematischer Schnitt durch das Nord-Malé Atoll

3.1.3 Klimatische und ozeanographische Verhältnisse

Die klimatischen und, mit zeitlicher Verzögerung, ozeanographischen Verhältnisse werden durch den saisonalen Wechsel monsunaler Luftmassen geprägt. Großräumig, für den nördlichen Indischen Ozean betrachtet, zeichnet sich der SW-Monsun (April bis Oktober) durch stetige, aus SW kommende Winde und relativ konstant SE setzende Oberflächenströmungen aus, der NE-Monsun (Dezember bis Februar) durch weniger konstante aus NE bis ENE kommende Winde und W bis NW-setzende Oberflächenströmungen. Die Intermonsunphasen sind durch wechselnde Winde und das Auftreten tropischer Stürme gekennzeichnet (PREU & ENGELBRECHT 1991).

Betrachtet man das den Indischen Ozean beherrschende Luftmassensystem jedoch auf kleinräumiger, lokaler Ebene in diesem Fall für das Nord-Malé Atoll zeigt sich ein etwas anderes Bild:

- (1) SW-Monsun: überwiegend Winde von W bis NW (HASTHENRATH & LAMB 1979) mit SE setzenden Meeresoberflächenströmungen (NATIONAL MARITIME MUSEUM 1988), die beim Auftreffen auf das Atoll überwiegend auf S-Richtung abgelenkt werden.

Auch die Aufzeichnungen der Klimastation des Malé Airports belegen (für die Jahre 1980 bis 1999) deutlich die Dominanz der W bis NW Winde (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMM (UNEP) 2002). Knapp 45% der Winde kommen aus W bis NW-licher Richtung, wohingegen aus WSW bis SSW-licher Richtung nur 14% auf das Nord-Malé Atoll auftreten. NE bis E-liche Winde treten mit knapp 25% in Erscheinung. Die Monate mit den meisten Sturmereignissen sind Mai, Juni und Juli.

(2) NE-Monsun: vorrangig Winde aus NE bis ENE mit überwiegend W bis NW setzenden Meeresoberflächenströmungen, die beim Auftreffen auf das Atoll N-liche Ablenkung erfahren (vgl. PREU & ENGELBRECHT 1991).

Beeinflusst werden die beschriebenen Strömungsverhältnisse durch die lokalen Reliefgegebenheiten (Kanäle zwischen den einzelnen Atollen), sowie durch Austauschströmungen zwischen der Atoll-Lagune und dem freien Ozean (Kanäle zwischen den Rifffstrukturen am Atollrand) (vgl. PREU & ENGELBRECHT 1991).

Das höchste astronomische Hochwasser (HHW) der gemischten Gezeiten liegt für die Hauptstadt Malé bezogen auf den MSL bei +0,64 m, das niedrigste astronomische Niedrigwasser (NNW) bei -0,56 m. Der MSL fluktuiert dabei um ca. 20 cm, mit einem Anstieg von 10 cm in den Monaten Februar bis April und einer Absenkung um 10 cm in den Monaten September bis November (GIERLOFF-EMDEN 1980, UNEP 2002).

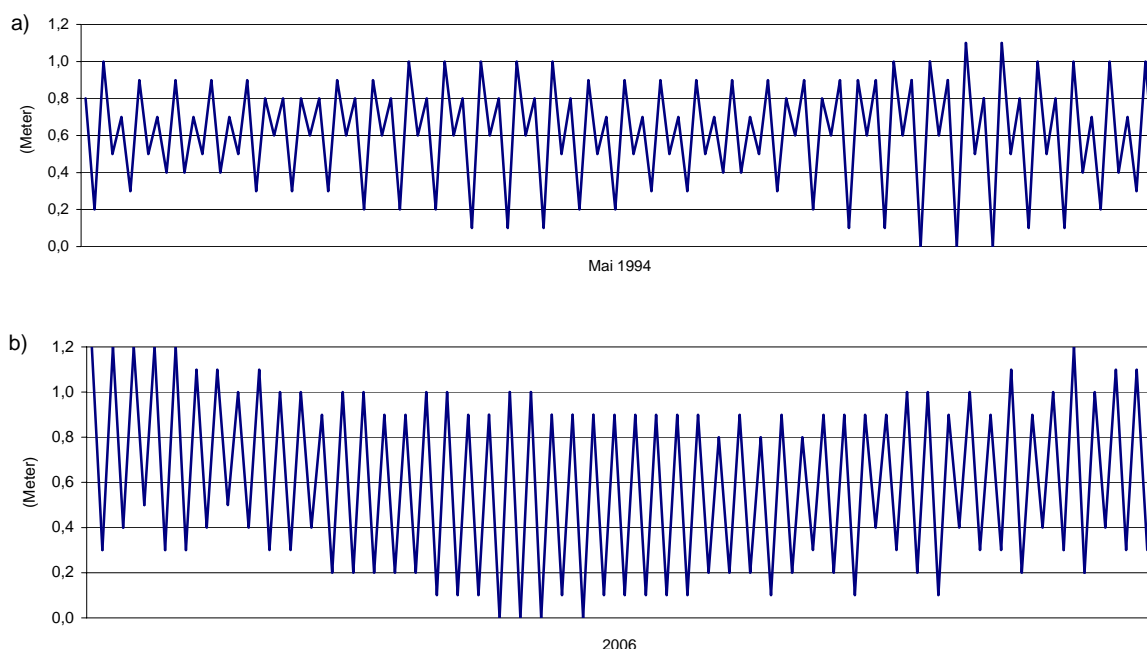


Abbildung 4: Tidekurven für Malé: a) für 1. bis 31. Mai 1994 tägliche und b) für 2006 wöchentliche Höchst- bzw. Tiefststände; Bezugsort Cochin; (Daten 2006 nach UNITED KINGDOM HYDROGRAPHIC OFFICE, Daten 1994 aus offizieller Tidetabelle, genaue Literaturangabe nicht bekannt).

Die Salinität liegt, bei einer relativ konstanten Wassertemperatur von 28-29°C, bei durchschnittlich 3,5% (innerhalb des Atolls zum Teil etwas darüber). Die mittlere Lufttemperatur liegt, bei einer Luftfeuchte zwischen 73% und 85%, bei ca. 28°C mit einer durchschnittlichen Varianz von nur rund 2,5°C.

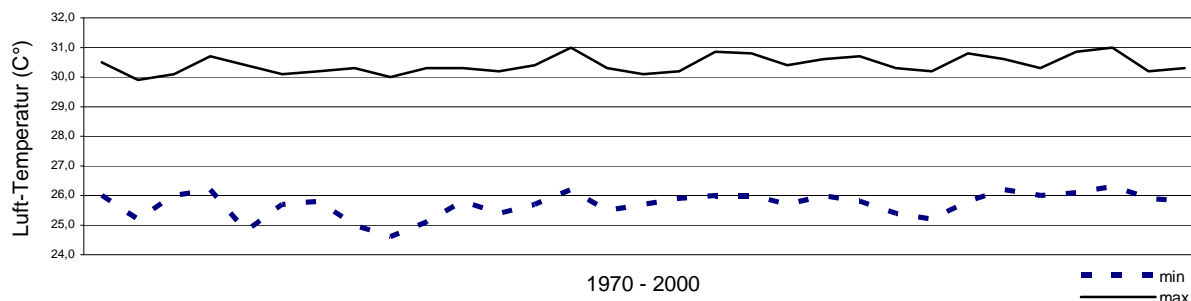


Abbildung 5: Mittlere jährliche Durchschnittstemperaturen für Malé, 1970-2000 (nach UNEP 2002)

Die mittleren Jahresniederschläge liegen für Malé bei ca. 2000 mm, wobei die Niederschlagsmenge über die Jahre starken Schwankungen unterliegen kann. So war innerhalb eines 30-jährigen Beobachtungsraums 1995 das trockenste Jahr mit 1407 mm und 1978 mit 2707 mm das feuchteste (UNEP 2002).

Die Monate mit den meisten Niederschlägen sind im Normalfall Mai, August, September und Dezember (STODDART (1971) gibt für Dezember 1970 eine Menge von 361,4 mm an). Da die Niederschläge sehr häufig in Form von lokal begrenzten Schauern oder Gewittern niedergehen, kann es sehr große Unterschiede in den Niederschlagsmengen sowohl zwischen den einzelnen Inseln als auch über die Jahre geben.

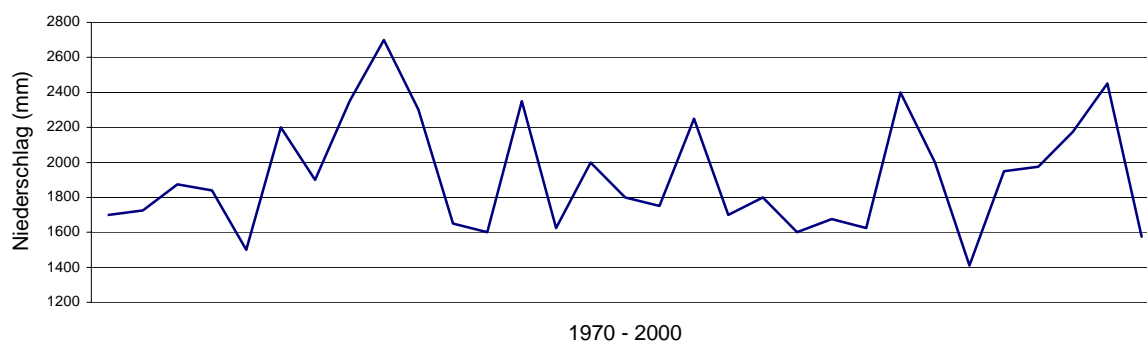


Abbildung 6: Mittlere jährliche Niederschläge für Malé, 1970-2000 (nach UNEP 2002)

3.2 Die Inseln des Nord-Malé Atolls

3.2.1 Vegetation und Landnutzung

Generell kann man die Inseln der Malediven, die zusammengenommen nur eine Fläche von ca. 298 km² einnehmen, hinsichtlich ihrer Nutzung in drei Kategorien einteilen: Inseln, die von der einheimischen Bevölkerung bewohnt sind bzw. genutzt werden, Inseln die Standort touristischer Nutzung sind („Resorts“) und „ungenutzte“ Inseln.

Die Vegetation der Malediven ist mit 260, meist salztoleranten natürlichen Arten als artenarm einzustufen (ADAM 1984).

Auf den ungenutzten (meist kleinen) Inseln des Nord-Malé Atolls prägen neben der Kokos-Palme (*Cocos uncifera*) die stielwurzelige Pandanus (*Pandanus spec.*), Scaevolasträucher (*Scaevola taccada*) und meist bodendeckende, Stauden im Strandbereich und Unterwuchs das Erscheinungsbild (FONSEKA & BALASUB-RAMANIAM 1984). Auf größeren Inseln gesellen sich diverse Baumarten wie Mahagoni, Eisen-Holz und Banyan, sowie vereinzelt Mangroven dazu. Unter anderem bedingt die forstwirtschaftliche Nutzung auf den Inseln aller Kategorien, dass natürliche geschlossene Baumbestände nicht mehr vorzufinden sind. So wurden im Jahr 2000 über 28.000 Bäume (überwiegend Eisen-Holz) gefällt (UNEP2002).

Auf den von Einheimischen bewohnten Inseln wird die Vegetation durch Baumfruchtarten (z. B. Mango, Papaya, Brotfrucht), Banane und Feldfrüchte wie Süßkartoffel, Taro und Melone ergänzt. Durch Kompostierung wird versucht die mageren Ah-C Böden mit ihren geringmächtigen humosen Horizonten (Insel Hembadoo ca. 35 cm) aufzuwerten.

Neben Fischfang, dem Anbau von tropischen Früchten und dem Gartenbau, dient auch die Kleinviehzucht als Ernährungsgrundlage. Auf Grund des stetig zunehmenden Bevölkerungsdrucks auf die Inseln werden immer häufiger Nutzungen wie Kleinviehzucht oder Anbau von Kokospalmen auf bislang unberührte Inseln ausgelagert. Eine Tendenz, die sich angesichts des stetigen Bevölkerungswachstums fortsetzen wird.

Auf den touristisch genutzten Inseln ist die natürliche Vegetation fast völlig verschwunden. Wenn überhaupt finden sich auf den größeren Resorts noch relikartige Überreste. Im Normalfall werden die Inseln vor Beginn der Bebauung komplett gerodet und später mit Kokos-Palmen und einigen Ziersträuchern „begrünt“.

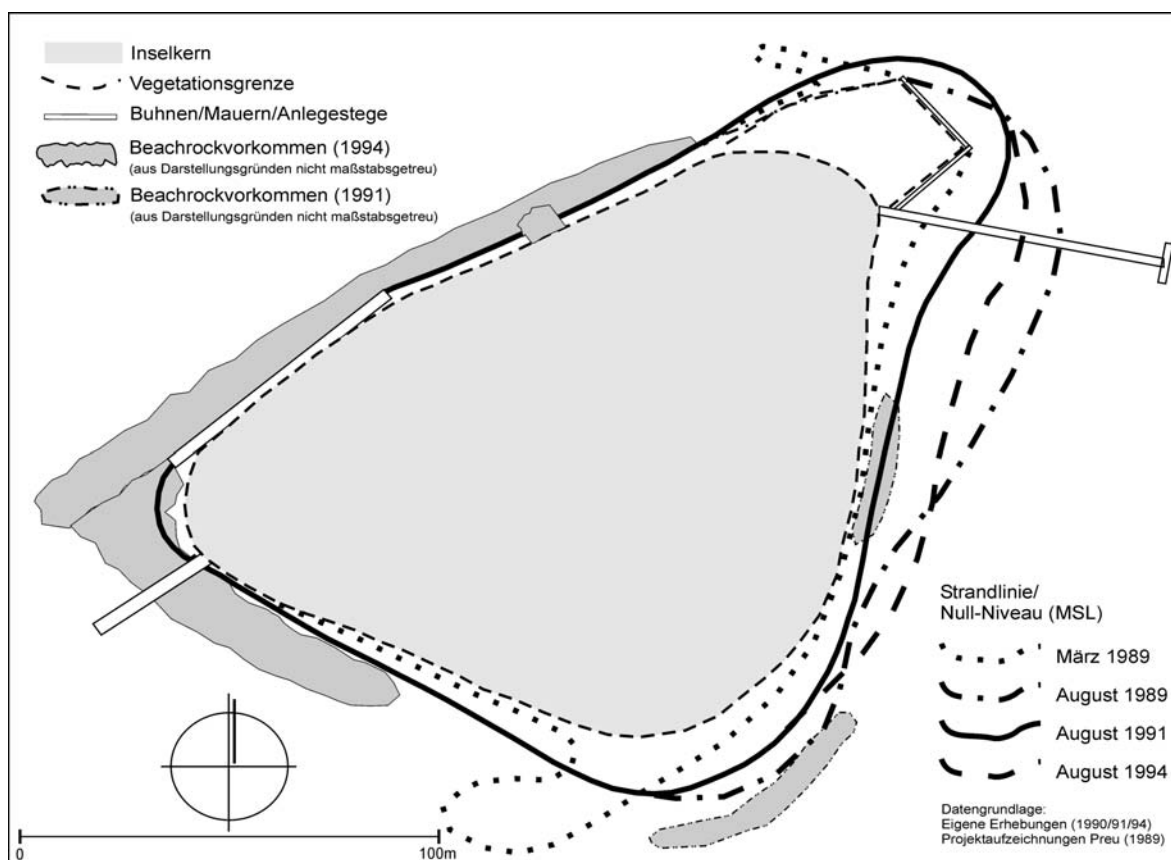
Eine weitere Nutzung, die alle drei Inselkategorien gleichermaßen betrifft, ist die Gewinnung von Baumaterial. Neben Holz sind Korallen und Korallensand die wichtigsten Baustoffe. Darüber hinaus findet auch Beachrock, der relativ leicht im Strandbereich abgebaut werden kann, Einsatz bei der Errichtung von Gebäuden.

3.2.2 Inselmorphologie

Die größte Landhöhe der zwischen wenigen 100 Quadratmetern bis mehr als fünf Quadratkilometer großen Inseln liegt bei ca. 3,2 m über dem MSL (WOODROFFE 1992), dabei liegen 80% der Landfläche weniger als einen Meter über der Hochwasserlinie (UNEP 2002). Bei den aus Lockersediment aufgebauten Strandwallinseln lassen sich generell zwei Grundtypen unterscheiden, die in verschiedenen Misch- bzw. Übergangsformen vorliegen können:

- (1) kreisförmige Inseln, bei denen eine zentrale Senke, die auch unter dem mittleren Meeresspiegel liegen kann, von Strandwällen umgeben ist.
- (2) lang gestreckte Inseln, deren zwei flankierende Strandwälle bei sehr schmalen Inseln zu einem verschmelzen können.

Die in Exposition zum Außenriff liegenden Strandwälle sind dabei mit durchschnittlich 1,5 m höher als die lagunenexponierten mit durchschnittlich 0,8 m (KLUG & PREU 1993). Je nach Exposition können die Inseln auch ein System aus mehreren Strandwällen besitzen. Dabei unterliegen die Strandbereiche/Strandlinien, bedingt durch die monsunale Dynamik und den Einfluss einzelner Sturmereignissen, einer ständigen Veränderung (vgl. Karte 1).



Karte 1: Veränderung der Strandlinie der Insel Hembadoo zwischen 1989 und 1994

Ein schematisiertes Querprofil vom Inselkern zur Riffkante (vgl. Abb. 7) zeigt folgende morphologischen und sedimentologischen Charakteristika (nach KLUG & PREU 1993, STODDART 1973, DAVIES et al. 1971):

Im Übergang zwischen dem vegetationsbestandenen Inselkern und dem Strand befindet sich der Strandwall mit einem steileren, dem Meer zugewandten und einem flacheren, gegen das Inselinnere abböschenden Hang. Der seeseitige Hang ist oft durch eine Erosionskante, die bis in den Wurzelbereich der Gehölzvegetation reichen kann, gekennzeichnet. Vom Fuß des Strandwalls zieht sich der meist aus Karbonatsanden (SCHWARZER 1993) aufgebaute Strand auf das Riffdach bis an die Niedrigwasserlinie. Er kann, bei Breiten bis zu 20 m, in allen altimetrischen Positionen Beachrock beherbergen. An den Strand schließen sich eine stellenweise gerippelte Sandzone und ein Mischbereich aus Feinsediment und Korallenbruch der verschiedensten Körnungen an. Lebende Korallenstöcke finden sich hier nur sehr selten in kleinen Vertiefungen, die bei Niedrigwasser nicht trocken fallen. Dieser „Inneren Zone“ folgt eine Zone gemischter Korallen. Beginnend mit ersten Geweihkorallen (v.a. *Acropora digitifera* & *conexa*) steigt die Bewuchsdichte mit zunehmender Entfernung vom Strand an. Es gesellen sich unter anderem die Blaue Koralle (*Heliophora coerulea*) und die gemeine Pilzkoralle (*Fungia fungites*) hinzu, wobei mit zunehmender Distanz die Hirschgeweihkoralle (*Acropora formosa*) an Übergewicht gewinnt und letztlich eine eigene Zone (Flächendeckung bis zu 70 %) bildet. An die „Acropora formosa Zone“ schließt sich bis an die Riffkante die „Äußere Zone“ mit gemischtem Korallenbewuchs (v. a. *Acropora spec.*, *Echinopora lamellosa*, *Leptoria phrygia* und *Goniastrea retiformis*) an, die bei Niedrigwasser vereinzelt trocken fällt. Bei Riffen, die zum offenen Meer hin exponiert liegen, kommt es sehr häufig zu einer Anhäufung von abgebrochenem Korallenmaterial unmittelbar hinter der Riffkante.

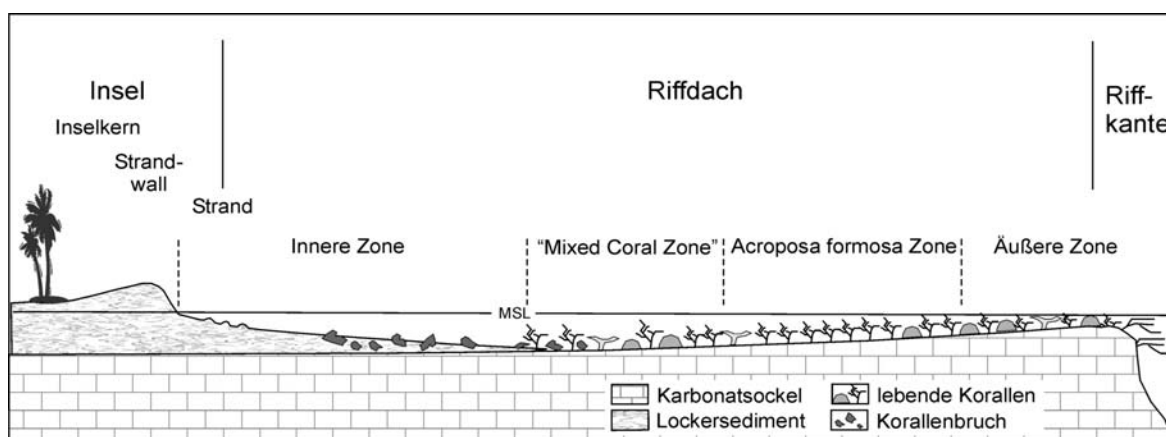


Abbildung 7: Schematisiertes Querprofil eines Riffdachs mit Insel auf den Malediven

3.3 Beachrock

3.3.1 Definition

Je nach Autor finden sich verschiedene Definitionen von Beachrock, die zum Teil bereits Bildungsfaktoren bzw. Bildungsmilieu mit einbeziehen. So spricht GIERLOFF-EMDEN (1980, S. 1212) von „...verfestigtem Gestein aus Lockermaterial durch Verbackung, Kalk-Zementierung im Gezeitenstockwerk,...entsteht auch rezent durch Zementationsvorgänge ... an Stränden sehr heißer, semiarider Regionen...“. BRICKER (1971) spricht in seinem Vorwort von „intertidal rock“ und „...sediment lithified in the intertidal plus sea spray zones“. Neuere Arbeiten schließen sogar Beachrockvorkommen gänzlich aus, die nicht im Intertidal liegen: „...a deposit that exhibits all characteristics of beachrock, but is determined to have been cemented in some environment other than the intertidal zone cannot, therefore, be considered beachrock...“ (SPURGEON 2003, S. 3).

In Anlehnung an KELLETAT (1998) soll Beachrock für diese Arbeit als „in situ, unter marinem Einfluss⁽¹⁾, zementiertes Lockermaterial“ bezeichnet werden. Dabei sind weitere Eingrenzungen dahingehend zu treffen, dass das gesamte Material vorher verfrachtet wurde⁽²⁾ und die Verfestigung ohne Sedimentdeckung⁽³⁾ welche durch Druck und/oder chemische Reaktionen in den oberen Sedimentschichten die Zementierung beeinflussen könnte stattfindet. Diese Eingrenzungen sind notwendig, um Beachrock von sog. cay sandstone / water-table rock⁽¹⁾ dessen Bildung rein meteorischem Wasser zugesprochen wird (MOORE 1977, GISCHLER & LOMANDO 1997) oder Äolianiten⁽³⁾ abzugrenzen.

Auf der Forschungsreise im August 1994 wurde vom Autor in einer Vertiefung eines (zum Großteil lebenden) Korallenstockes verhärtetes Sediment gefunden⁽²⁾, welches eher einer sekundären Anbackung im Sinne eines „superimposed“ Beachrock gleichkommt, denn einer Beachrockbildung im eigentlichen Sinne (siehe Bild 1).



Bild 1: Verhärtetes Sediment in einer Vertiefung in der Oberfläche eines Korallenstocks (Außenriffdach, Rasfari-Faro, August 1994)

Unter „superimposed“ Beachrock sind nach KELLETAT (1998) sekundäre Anbackungen von Sediment, zumeist innerhalb der vorhandenen Hohlformen, zu verstehen. Durch das Vorhandensein von Kristallisationskeimen auf der Beachrockoberfläche, die zur Fixierung neuer Partikel bereit stehen, können sich sowohl eingespültes Sediment zum Teil mit Artefakten aber auch abgebrochene und verlagerte Beachrockbruchstücke mit dem originalen Beachrock verbinden.

3.3.2 Vorkommen im Nord-Malé Atoll

Beachrock tritt im Nord-Malé Atoll auf allen Reliefstrukturen – mit Ausnahme der Tilas – unabhängig ihrer topographischen Position sowie Exposition zu den monsonalen Verhältnissen auf (vgl. Abb.8). Neben einzelnen, den verschiedenen Riffstrukturen aufsitzenden Beachrockvorkommen, zeigen die Inseln größte Varianz. Sie können von Beachrock umgürtelt sein, nur fleckenhafte Vorkommen besitzen oder in den Inselkern auslaufende Beachrockvorkommen aufweisen. Wie eigene Grabungen ergaben, finden sich auch im Inselinneren verhärtete Sedimente. Ob es sich dabei um Beachrock im Sinne der Definition handelt, der im Zuge des Aufwachsens der Insel überdeckt wurde, oder um eine „...50 bis 70 cm starke Sandsteinschicht ...“ (ARNBERGER 1988, S. 246) bzw. „... phosphate rock or cay sandstone ...“ (KENCH et al. 2005, S. 147), lässt sich nicht mit Sicherheit sagen. Jedoch deuten auch Angaben in COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (2005) auf das Vorhandensein von Beachrock im Inselkern hin.

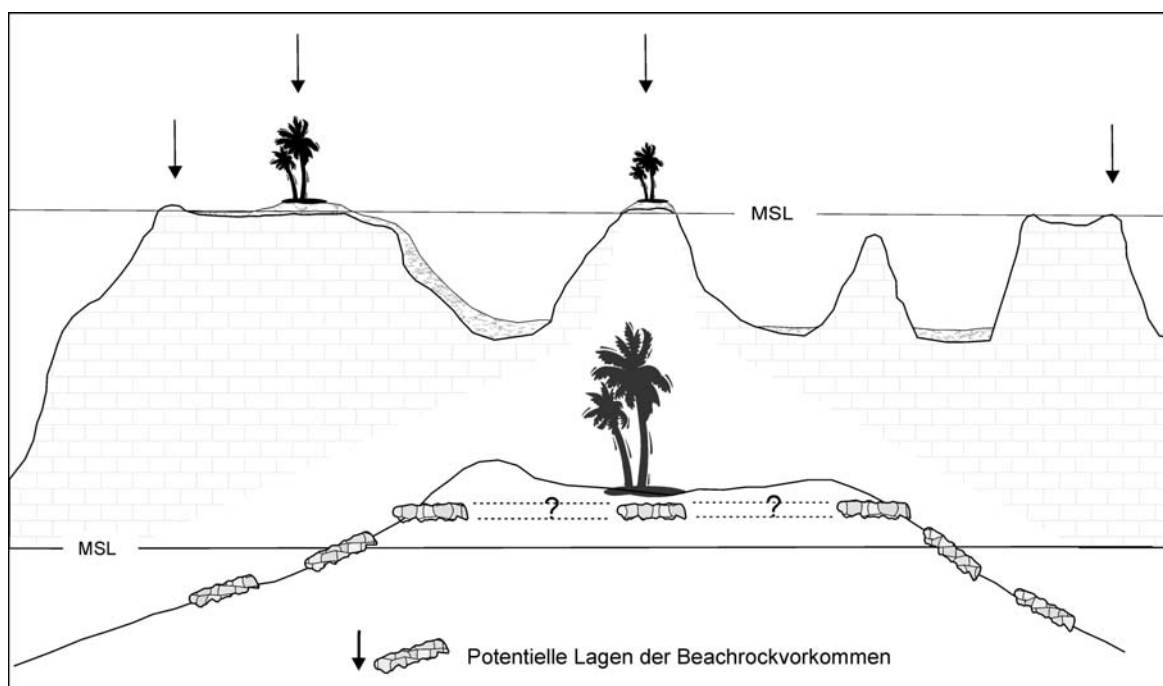


Abbildung 8: Potentielle Lagen der Beachrockvorkommen im Nord-Malé Atoll

Die Vorkommen sind überwiegend seewärtig geneigt und differieren stark in Größe und Mächtigkeit, morphologischem Aufbau, sedimentologischer Zusammensetzung und altimetrischer Position (vgl. Kap. 5). Darüber hinaus kann der Beachrock fest mit dem Riffdach verbunden sein, oder (mit einer sehr kleinen Übergangszone in der die Festigkeit abnimmt) auf dem Lockersedimentkörper der Strände aufliegen.

Beachrock findet sich heute im Nord-Malé Atoll überwiegend im Intertidalbereich. Seine Fußlinie liegt jedoch auch häufig unterhalb des Tideniedrigwasser-Niveaus, seine Dachfläche vereinzelt über dem Tidehochwasser-Niveau. Neben ihrer sedimentologischen Zusammensetzung die von sehr homogenem, feinsandigem bis zu sehr heterogenem Aufbau variiert, besitzen die Beachrockvorkommen einen sehr unterschiedlichen morphologischen Aufbau. Dieser geht von einfachen, nicht strukturierten Platten bis hin zu mehrfach gestuften, komplexen Vorkommen (siehe Bilder 2 bis 4). Unabhängig von ihrer Größe, die von wenigen Quadratmetern bis hin zu mehreren Metern Breite und hunderten Metern Länge reicht, besitzen die Beachrockvorkommen Mächtigkeiten (im Sinne einer vertikalen Erstreckung) von maximal 1,6 m (Vorkommen Hem 1, Insel Hembadoo, Testgebiet West).

Die „Niveaus“ (Abstufungen, oft treppenartiger Natur, innerhalb eines Beachrockvorkommens) zeigen zum überwiegenden Teil unterschiedliche sedimentologische Zusammensetzungen und können in Anzahl und Ausprägung innerhalb eines Vorkommens schwanken. Die über dem mittleren Meeresspiegel (MSL)



liegenden Oberflächen der Vorkommen besitzen ein Mikrorelief, das stark durch bioerosive Formen geprägt ist; die unter dem MSL liegenden Bereiche weisen eher glattere, abrasiv gestaltete Oberflächen auf. Dabei weisen alle Vorkommen, unabhängig ihrer Lage zum MSL, mehr oder weniger starke mechanische Zerstörungen auf, die von der Bildung kleiner Klüfte und Risse bis hin zum Zerbrechen in einzelne Schollen und deren Über- bzw. Verlagerung (siehe Bild 3) reicht.

Bild 2: Einfach strukturiertes Beachrockvorkommen unter MSL (Insel Helengeli, August 1994)



Bild 3: Komplexes Beachrockvorkommen im Niveau des MSL (Insel Rasfari, August 1994, Personen stehen auf Stufenkanten), mit Anzeichen extremer mechanischer Zerstörung; aus Inselkörper ausstreichend.



Bild 4: Bankartiges, den Inselkörper flankierendes Vorkommen im Niveau des MSL (Insel Olahali, August 1994)

4 Untersuchungsmethoden

4.1 Geländearbeiten

4.1.1 Generelle Informationen

4.1.1.1 Auswahl der Testgebiete

Die Grundlage für die Auswahl der Testgebiete im Nord-Malé Atoll bildeten, neben den Geländebeobachtungen während mehrerer Profilfahrten und Vermessungsarbeiten bei den eigenen Forschungsaufenthalten 1990 und 1991 die Unterlagen des Forschungsaufenthaltes 1989 von Prof. Preu, sowie die satellitengestützten Geländedaten von ENGELBRECHT & PREU (1993). Diese ermöglichten das Auffinden von an bzw. über den Meeresspiegel reichenden Riffstrukturen, die neben den Inseln potentielle Fundorte von Beachrockvorkommen sind. Es wurden insgesamt vier Testgebiete im Nord-Malé Atoll ausgewählt (vgl. Karte 2, S. 28): im Norden, Nordosten, Südosten und Westen. In den Testgebieten wurden alle zur damaligen Zeit sichtbaren Beachrockvorkommen vermessen, kartiert und beprobt. Im Süden wurde keine Testfläche ausgegliedert, da augenscheinlich keine Beachrockvorkommen vorhanden waren.

4.1.1.2 Bestimmung des „Null-Niveaus“

Da es im Nord-Malé Atoll nur einen Pegel im Hafen von Malé gibt, anhand dessen ein mittlerer Meeresspiegel - der die Grundlage für die Vermessung der Inseln bzw. Beachrockvorkommen bilden sollte - bestimmt werden kann, musste eine andere Methode zur Festlegung eines „Null-Niveaus“/MeanSeaLevel angewandt werden. Von Bedeutung war, dass dieses Null-Niveau in allen Testgebieten ermittelt werden konnte.



Für die Bestimmung des MSL wurden an einem Stock Getränkedosen mit der Trinköffnung nach oben befestigt. Dieser wurde bei Niedrigwasser in einem Loch im Strand außerhalb der Wellenauflaufzone so befestigt, dass die Trinköffnung der untersten Dose knapp über dem Wasserspiegel lag. Mit einsetzender Flut füllten sich das Loch und die Dosen. Mittels der Gezeitentabelle für Cochin konnten mit den entsprechenden Zu- bzw. Abschlägen sowohl Zeiten als auch die Höhen der Hoch- und Niedrigwasserstände (1994 jeweils +10 cm) ermittelt, und somit ein MSL festgelegt werden.

Bild 5: Dosenpegel (Aug.1994)

Mehrfachvermessungen der Inseln Hembadoo und Rasfari (Forschungsreisen 1990, 1991 und 1994) ergaben einen Höhenfehler von +/- 5 cm. Um das Null-Niveau auf Beachrockvorkommen außerhalb von Inseln übertragen zu können, wurden in den Testgebieten immer zuerst die Inseln vermessen und an Beachrockvorkommen und/oder Anlegestegen Markierungen angebracht. An diesen wurde unmittelbar vor der Abfahrt zum - größtenteils bereits vorher eingemessenen - Beachrockfundort der aktuelle Wasserstand ermittelt und entsprechend der Fahrtzeit über die Gezeitentabelle korrigiert.

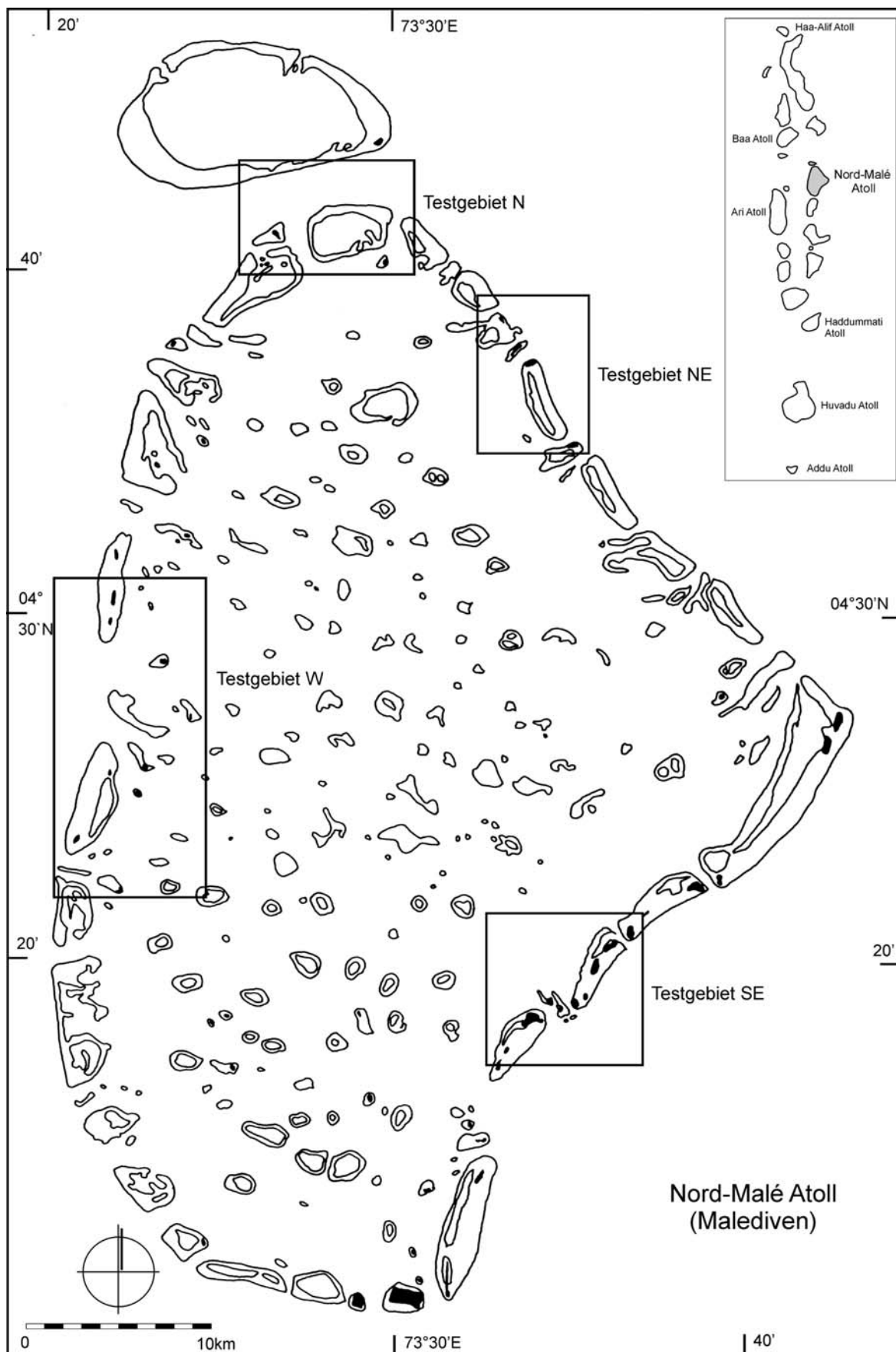
4.1.2 Vermessung der Inseln und Beachrockvorkommen

Für die Vermessung der Inseln und deren Beachrockvorkommen diente ein handelsübliches Nivelliergerät. In unzugänglichen Bereichen und bei Vorkommen außerhalb von Inseln wurde mit einer Schlauchwaage vermessen. Durch eine Kontrollvermessung der Insel Hembadoo konnte wiederum ein Höhenfehler von +/-5 cm ermittelt werden. Ein Problem bei der Einmessung der Beachrockvorkommen war deren häufig sehr unruhige Oberfläche. Um auch hier den Fehler möglichst gering zu halten, wurde versucht beim Einmessen der Beachrockprofile eine mittlere Oberflächenhöhe aufzunehmen.

Bei den Inseln wurde zunächst der Verlauf der aktuellen Strandlinie (= Null-Niveau) vermessen und die Beachrockvorkommen in ihrer Lage (Streichrichtung, Exposition, Länge, Breite) kartiert. Als Beachrockvorkommen wurden dabei Funde differenziert, die sich über ihre seitlichen Begrenzungen und Streichrichtungen deutlich von anderen Funden abhoben. In einem zweiten Schritt wurden an verschiedenen Stellen der Inseln zumindest bis zur Vegetationsgrenze und durch jedes Beachrockvorkommen Profile gelegt. Dabei erfolgte eine Aufnahme der Höhenlagen und des morphologischen Aufbaus (Erosionskanten, Beachrock-Niveaus, Neigungsverhältnisse etc.).

Anhand der ermittelten Daten konnten abschließend Inselkarten erstellt werden. Eine Aufnahme und kartographische Umsetzung der Nutzungsstrukturen (Gebäude, Wege, Abwassereinrichtungen etc.) und der Vegetation erfolgte für die touristisch genutzten Inseln bereits auf bzw. nach den Forschungsreisen 1990 und 1991, welche jedoch aus Übersichtlichkeitsgründen nicht in die jetzigen Karten eingearbeitet sind.

Bei Beachrockvorkommen außerhalb von Inseln wurde im Prinzip wie bei der Inselvermessung vorgegangen, jedoch die Null-Niveau-Linie nur über die Profile ermittelt, so dass unter zu Hilfenahme von Bildern und Feldbucheintragungen nur Lageskizzen ohne exakten Verlauf der Null-Niveau-Linie herstellbar waren.



Karte 2: Lage der Testgebiete im Nord-Malé Atoll der Malediven

4.1.3 Beprobung

Für die späteren Analysen fand entlang der gelegten Profile die Beachrock- und Sedimentbeprobung statt. Dabei wurde, wenn es die äußeren Umstände zuließen (Brandung, Wasserstand etc.), aus jedem Beachrockniveau eine Probe abgeschlagen oder bei weniger festen Vorkommen abgesägt. Mit einem Handstechkasten (Volumen ca. 200 ml) wurden jeweils land- und seewärtig des Beachrocks Sedimentproben entnommen.

Insgesamt standen 76 Beachrock- und 36 Sedimentproben für die Analysen zur Verfügung.

4.2 Probenaufbereitung

Aus den Beachrockproben wurde mit einem Nass-Schneidegerät drei Würfel herausgeschnitten, darunter einer ohne Oberflächenmaterial für die spätere chemische Analyse verpackt. Die beiden anderen Würfel wurden zur späteren Orientierung (Lage der Beachrockprobe am Entnahmeort) mit Beachrockoberfläche für die Anfertigung der Dünnschliffe und die sedimentologischen Untersuchungen bereitgestellt, der Rest des Probenmaterials in dünne Scheiben zerschnitten und nach Einschlüssen (Artefakte, Blätter, Äste etc.) untersucht.

Aus den Sedimentproben wurden jeweils ca. 50 g für die chemische Analyse entnommen, der Rest für die sedimentologische Untersuchung getrocknet.

Der für die chemischen Analysen bereit gestellte Würfel sowie die entsprechenden Sedimentproben wurden mit Handmörser und Gesteinsmühle zermahlen. Aus ca. 50 g Probenmaterial konnten 20 g entnommen und für die chemische Analyse bereitgestellt werden.

4.3 Laborarbeiten

4.3.1 Dünnschliffe und Rasterelektronenmikroskopie

Die Anfertigung der Dünnschliffe diente der Bestimmung der Matrix, im Speziellen der Differenzierung der kristallinen Varianten Aragonit und Calcit des Kalziumkarbonates. Sechs Dünnschliffe wurden bereits 1995 vom Geologischen Landesamt in München angefertigt (sie dienten als Kontrollproben), 24 Schliffe 2004 von Herrn Reimers (Universität Kiel). Die Auswertung der Dünnschliffe erfolgte vom Autor selbst am Lehrstuhl für Biologie der Universität Augsburg unter Verwendung eines Mikroskops mit 400-facher Vergrößerung. Da anhand der Dünnschliffe nur die nadelförmigen Kristallstrukturen eindeutig dem Aragonit zugeordnet werden konnten (für alle anderen Kristallformen wurde

Calcit angenommen), wurden zur Verifizierung der Ergebnisse zusätzlich 19 weitere Proben (darunter je eine Referenzprobe aus Ägypten und Tonga, sowie 9 Wiederholungsproben) rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Die ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy) - Analysen wurde am Lehrstuhl für Festkörperphysik der Universität Augsburg, Prof. Dr. Armin Reller von Frau Silke Weigel durchgeführt.

4.3.2 Untersuchung der chemischen Zusammensetzung mittels ICP-OES

Für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Beachrock- bzw. Sedimentproben wurden jeweils 0,4-0,5 g des aufbereiteten Probenmaterials über die optische Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) analysiert. Die Analyse fand am Institut für Strukturforschung und Planung in agrarischen Intensivgebieten (ISPA) der Hochschule Vechta statt. Dabei wurden die Elemente ausgewählt, die sowohl in Karbonaten als auch im Meerwasser in größeren Mengen auftreten. Durch die Verschneidung der häufigsten Elemente in Karbonaten (nach MASON & MOORE 1985) und der Hauptkomponenten des Meerwassers (nach DIETRICH ET AL. 1975) wurden Calcium, Magnesium, Eisen, Schwefel und Mangan ausgewählt. Ziel war es, Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung von Beachrock und Sediment aufzudecken bzw. Anreicherungen von z. B. Magnesium im Beachrock festzustellen, die wiederum weitere Rückschlüsse auf die Zementzusammensetzung geben würden. Insgesamt wurden 85 Beachrock- und 45 Sedimentproben, inklusive Zweit- und Wiederholungsmessungen analysiert.

4.3.3 Korngrößenanalysen

Da es nicht möglich war, den Beachrock in seine Einzelkomponenten zu zerlegen, ohne diese zu zerstören, konnte die Analyse der Korngrößenzusammensetzungen nur manuell ausgeführt werden. Das heißt es konnten nur qualitative Aussagen mit Angabe von Tendenzen zu den Korngrößen gemacht werden. Für die Ermittlung der Korngrößen wurde ein 2 mm - Raster aufgelegt und die Körnungen von Hand ausgezählt. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, fand die Auswertung der Sedimentproben nach dem gleichen Verfahren statt. Dabei wurde jeweils dreimal ausgezählt. Beim Sediment durch die Auswertung neuer Stichproben aus der Gesamtprobe, beim „Beachrock-Würfel“ durch die Untersuchung sowohl der Stirnfläche als auch der zwei im rechten Winkel dazu stehenden Unter- bzw. Seitenfläche. Diese Mehrfachauswertungen waren notwendig, da die Einzelfragmente oftmals eher scherbigen, weniger kugeligen Charakter aufweisen.

Ziel war es, heraus zu finden, in wie weit sich die Beachrockvorkommen einem bestimmten Korngrößenspektrum zuordnen lassen, die einzelnen Niveaus Unterschiede aufweisen, ein Bezug zur Entnahmhöhe erkennbar ist und Übereinstimmungen mit den Korngrößen der jeweiligen Sedimente vorliegen.

4.4 Topographisch-morphologische Untersuchungen

Im Zuge der topographisch-morphologischen Untersuchungen wurden die Beachrockvorkommen hinsichtlich ihres morphologischen Aufbaus, ihrer Größe, ihrer Lage zum MSL und ihrer vertikalen Erstreckung sowie hinsichtlich ihrer topographischen Lage und Expositionen analysiert. Durch Korrelationen der Einzelergebnisse zueinander, sowie zu den lokalen topographischen, morphologischen, ozeanographischen und klimatischen Gegebenheiten sollten die, bei der Beachrockgenese wirkenden Faktoren aufgedeckt bzw. Faktoren, die keinen direkten Einfluss auf die Bildung der Vorkommen haben, ermittelt werden. Schlussfolgernd sollte dann das Bildungsmilieu, im engeren Sinne die Lage zum mittleren Meeresspiegel bestimmt werden.

5 Analyseergebnisse

5.1 Ergebnisse der Probenaufbereitung und Laboranalysen

5.1.1 Übersicht über Lage und Anzahl der Beachrockvorkommen

Die topographische Lage der Beachrockfundorte, die Anzahl der Vorkommen und die Probenkennungen sind in Abbildung 9 zusammengestellt.

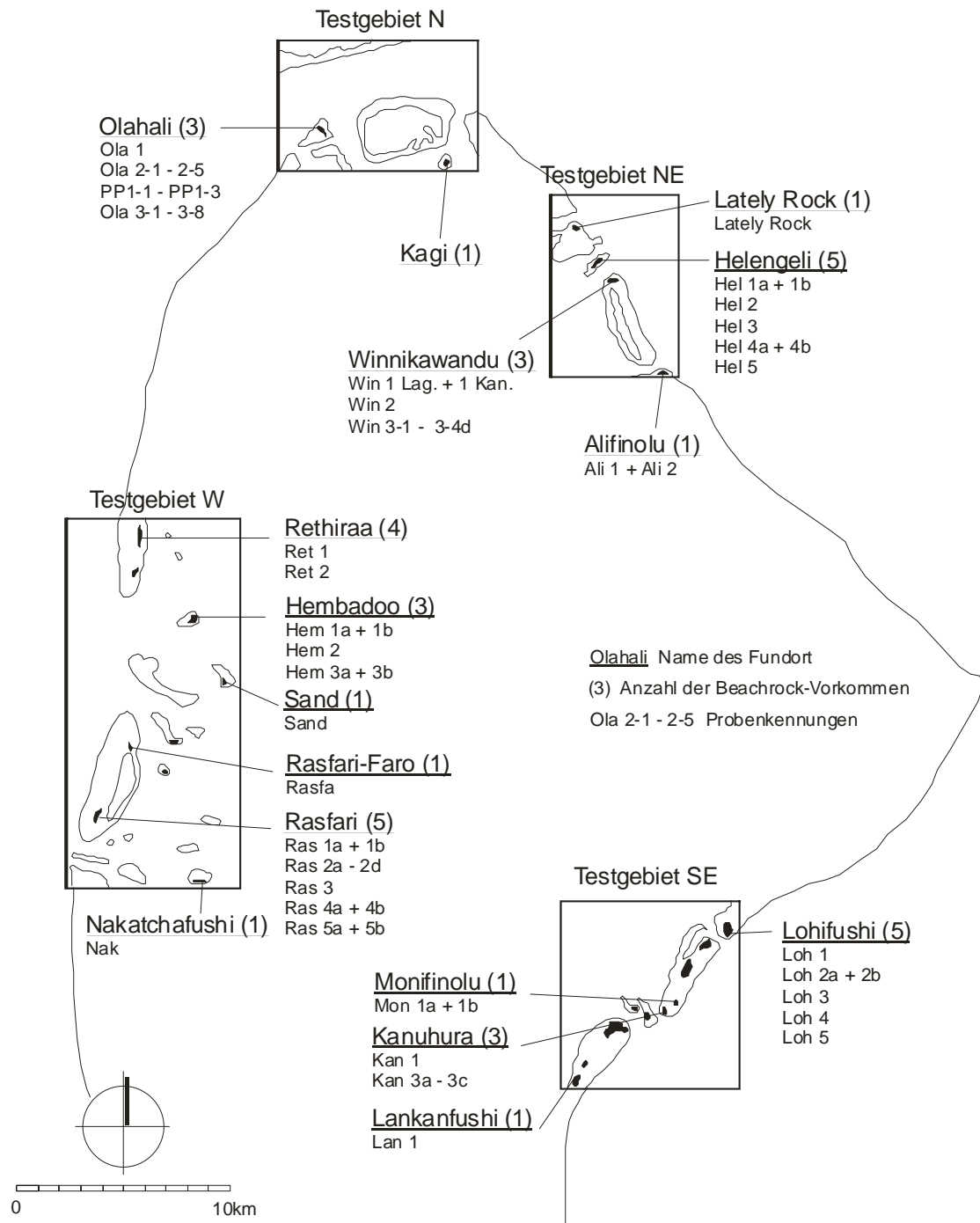


Abbildung 9: Topographische Lage der Beachrock-Fundorte, Anzahl der Vorkommen und Probenkennungen.

5.1.2 Ergebnisse der Probenaufbereitung

Bei der mechanischen Zerlegung von ca. 120 kg Beachrock-Probenmaterial aus den vier Testgebieten und dessen Durchsicht wurden keinerlei Einschlüsse wie Ton- oder Glasscherben, Metallgegenstände oder Knochen gefunden, die als Material für Datierungen dienen hätten können, bzw. direkte Rückschlüsse auf das Alter der Zementierung zugelassen hätten. Erstaunlicher Weise konnten trotz der doch recht beträchtlichen Menge an Material nicht einmal Blätter oder Äste gefunden werden, die üblicher Weise auf bzw. in den Lockersedimentkörpern der Stränden vorzufinden sind.

5.1.3 Ergebnisse der Dünnschliffauswertung

Bei der Auswertung der Dünnschliffe wurde gezielt nach den Kristallstrukturen des Aragonit gesucht, welcher mariner Herkunft zugeschrieben wird. Die Qualität der Dünnschliffe nur die direkte Zuordnung der stengelig, fibrösen Kristalle zum Aragonit erlaubte, mussten alle anderen kristallinen Strukturen dem Calcit zugeordnet werden. Somit waren die Beachrockzemente wie folgt zu klassifizieren: nur Aragonit (A), überwiegend Aragonit (A(C)), Aragonit und Calcit (A/C), überwiegend Calcit (C(A)) und nur Calcit (C).

Wie aus Tabelle 2 und Abbildung 10a (beide Seite 34) ersichtlich, zeigen sich sowohl zwischen den Inseln, als auch innerhalb einzelner Beachrockvorkommen unterschiedliche Zementzusammensetzungen. Dabei stehen die Zemente bzw. Zementkombinationen in keinem Zusammenhang mit der topographischen Lage, der Basis der Beachrockvorkommen (Riffdach oder Lockersedimentkörper der Inseln) der Entnahmehöhen der Proben oder den jeweiligen Testgebieten.

So weisen sowohl das aussenriffexponierte Vorkommen Lately Rock als auch das in der Atolllagune befindliche Vorkommen Sand beide Aragonit als Zement auf. Ebenfalls zeigen die auf dem Riffdach liegenden Vorkommen Lately Rock und Winnikawandu 3 (die noch dazu annähernd gleich exponiert liegen), genauso wie die den Lockersedimentkörpern der Inseln aufsitzenden Vorkommen Olahali 3 und Rasfari 5 unterschiedliche Zemente bzw. Zementkombinationen. Hinsichtlich der Beziehung der Zemente zum rezenten mittleren Meeresspiegel können weder mittels der Übersicht (Abb. 10a-1) noch über die Zementzusammensetzungen der einzelnen Niveaus der Vorkommen Olahali 3 (Abb. 10a-3) oder Rasfari 2 (Abb. 10a-4) regelhafte Zusammenhänge abgeleitet werden.

Tabelle 2a: Zementzusammensetzung der Beachrockproben (Dünnschliffauswertung)

Probenkennung	Lately Rock	Sand	Mon 1a	Hem 3a	Hel 3	Win3-4c	Win 3-4c K.	Kan 3a	Kan 3b	Kan 3c	Ras 2a	Ras 2b	Ras 2c
Zementklasse	A	A	C (A)	C	C (A)	C	C	C (A)	C (A)	C	A/C	C (A)	A
Probenkennung	Ras 2d	Ras 5a	Ras 5b	Ola 3-1	Ola 3-2	Ola 3-3	Ola 3-4	Ola 3-5	Ola 3-6	Ola 3-7	Ola 3-8		
Zementklasse	A/C	A (C)	C (A)	C (A)	A	A (C)	A/C	C (A)	A/C	C (A)	C (A)		

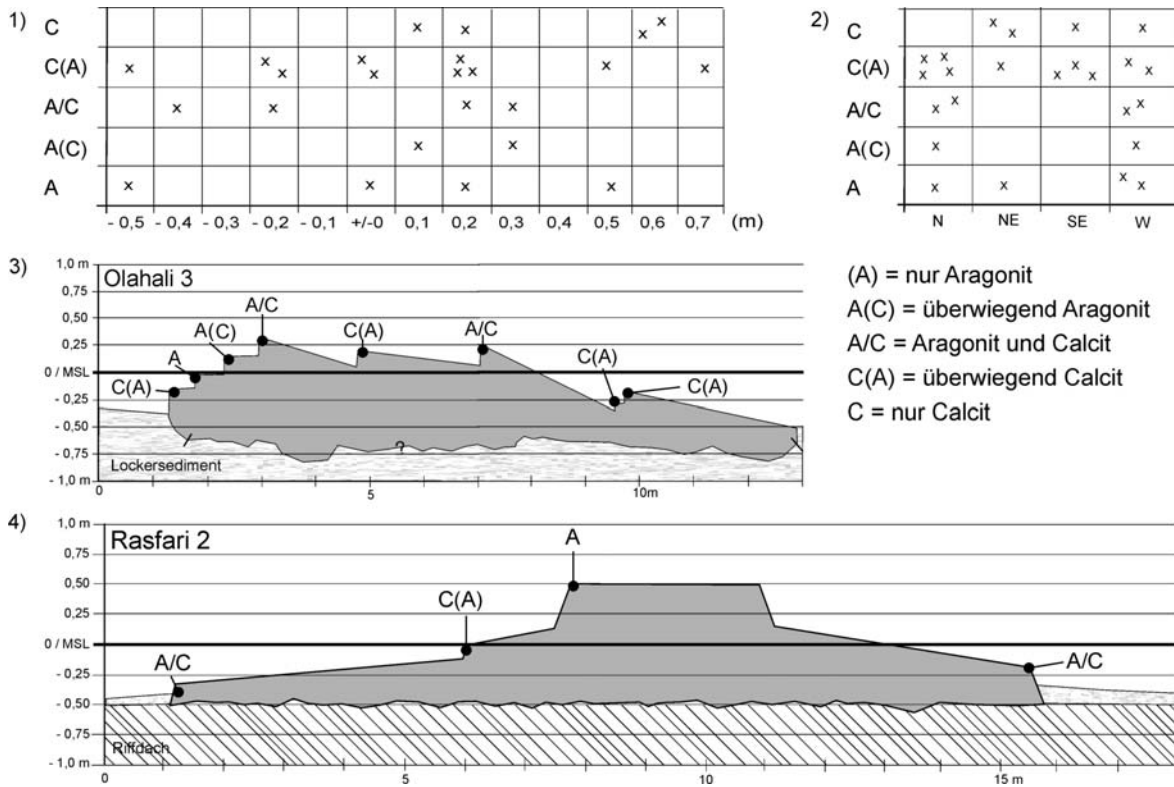


Abbildung 10a: Zuordnung der Zementklassen (Dünnschliffauswertung) zu 1) der Entnahmehöhe der Probe, 2) den Testgebieten und den Beachrockvorkommen 3) Olahali 3 und 4) Rasfari 2

5.1.4 Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie (ESEM)

Die Auswertung der ESEM-Daten (vgl. Tabelle 2b) zeigt die dominierende Rolle des Aragonit. Entgegen der Ergebnisse der Dünnschliffauswertung (vgl. Wiederholungsproben Ola 3-1 bis 3-8) liegen für die maledivischen Beachrockproben keine Mischungen von Aragonit und Calcit in der Matrix vor. Nur in einer Sedimentprobe wurde Calcit gefunden. Stattdessen findet sich in ca. 50 % der analysierten Beachrocks die instabile, wenig verbreitete Kalziumkarbonat-Modifikation des Vaterit mit seinen typischen kugelförmigen Kristallaggregaten, den so genannten „Sphärolithen“ (vgl. Tafel 1, S. 37, Beachrockprobe Winnikawandu 1). Vaterit entsteht durch schnelle Ausfällung aus stark übersättigten Lösungen, neigt dabei jedoch zur Umwandlung in Aragonit oder Calcit (KLÜFERS 2005). Erstaunlicher Weise finden sich – soweit dem Autor bekannt – keine Hinweise in der Literatur, welche Vaterit als potentielle Zementart angeben. Somit kann keine Aussage bezüglich seiner Bedeutung für die initiale Beachrockbildung gemacht werden. Es ist fraglich ob es sich hierbei um eine maledivische Besonderheit handelt, oder sich Vaterit bei der Anwendung anderer Methoden als der ESEM-Analyse nicht ermitteln lässt.

Tabelle 2b: Zementzusammensetzung der Beachrockproben (ESEM-Auswertung)

Probenkennung	Lately Rock	Ali 1	Ali 2	Hem 1a	Hem 1b	Loh 5	Ras 1a	Ras 1b	Win 1 Lag.	Ola 3-1	Ola 3-2	Ola 3-3
Zementklasse	A/V	A/V	A/V	A	A	A/V	A/V	A	A/V	A	A	A
Probenkennung	Ola 3-4	Ola 3-5	Ola 3-6	Ola 3-7	Ola 3-8	Ägypten	Tonga	Sed 1	Sed 2	Sed 3	Sed 4	Sed 5
Zementklasse	A	A	A	A	A	A/C/V	A	A/V	A/V	A/V	A/C	A/V

A = Aragonit, V = Vaterit, C = Calcit

Setzt man die Zementzusammensetzungen der Beachrockproben in Bezug zu ihrer Entnahmehöhe und zu den Testgebieten (vgl. Abb. 10b) zeigt sich lediglich, dass in den Testgebieten NE und SE reine Aragonit-Proben fehlen. Dies war auch bei der Dünnschliffauswertung tendenziell zu beobachten.

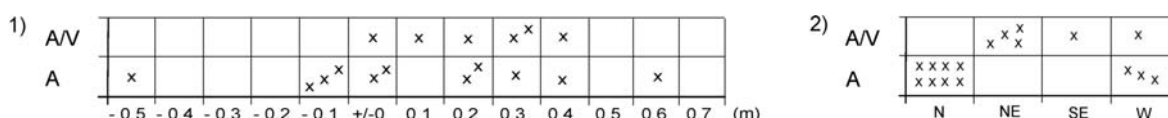


Abbildung 10b: Zuordnung der Zementklassen (ESEM-Auswertung) zur Entnahmehöhe (1) und den Testgebieten (2)

Eine Zusammenfassung der Daten der Dünnschliffauswertung und der ESEM-Daten (vgl. Abb. 10c) bestätigt die bei den jeweiligen Analysen erlangten Ergebnisse, dass sich keine regelhaften Zusammenhänge zwischen den Zementen bzw. Zementkombinationen bezüglich ihrer Entnahmehöhe oder ihrer allgemeinen topographischen Lage ergeben. Allerdings zeigt sich deutlich die dominierende Rolle des Aragonit in den Zementen.

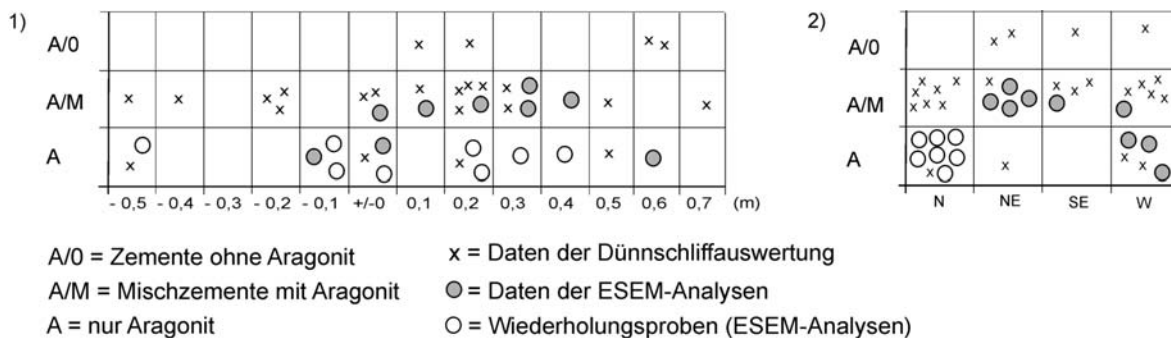
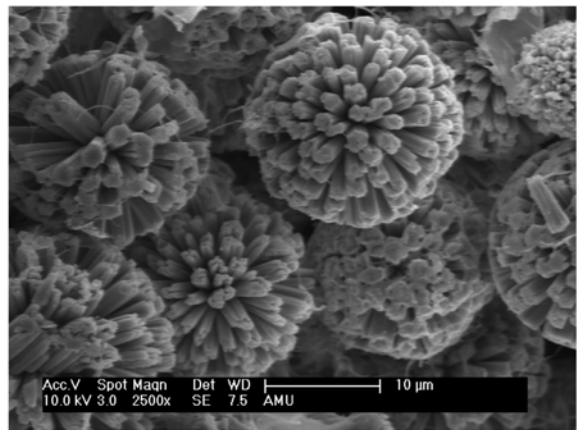
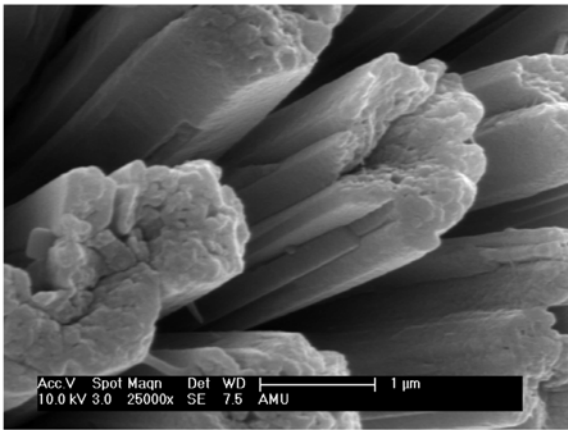
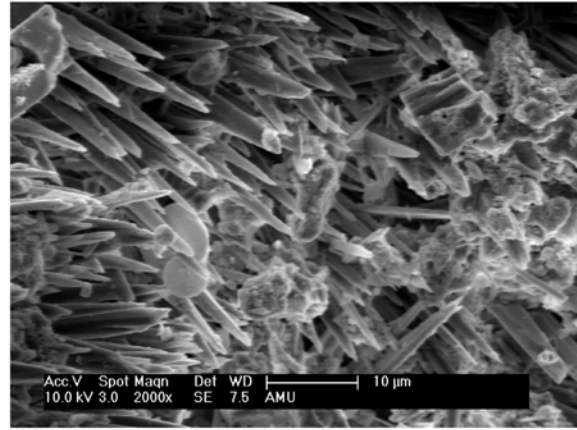
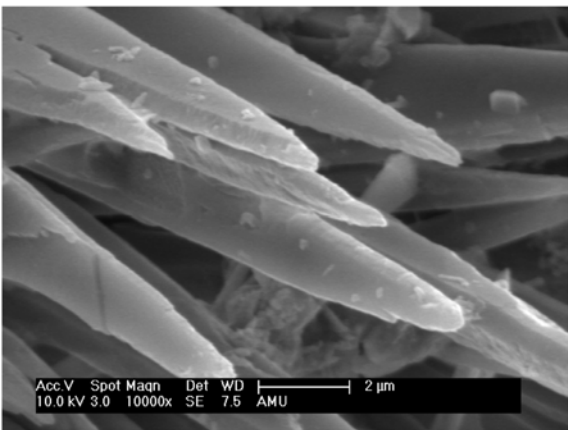


Abbildung 10c: Zusammenfassende Zuordnung der Zementklassen (Dünnschliff- und ESEM-Auswertung) zur Entnahmehöhe (1) und den Testgebieten (2)

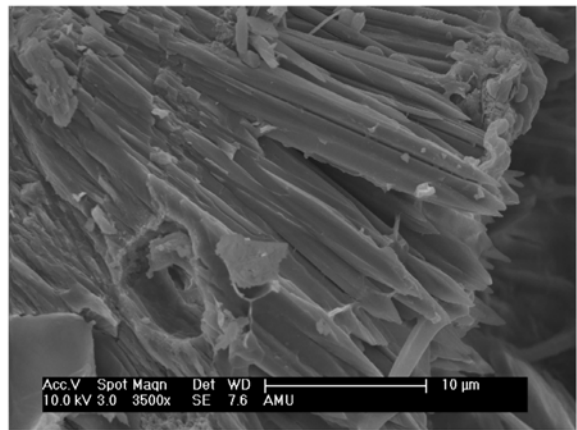
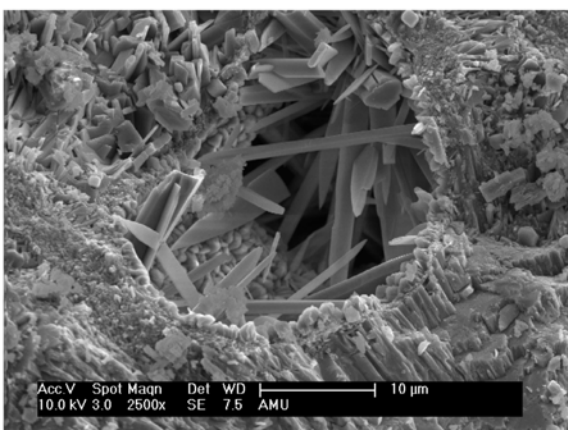
Beachrockprobe Winnikawandu 1 Lagune



Beachrockprobe Alifinolu 1

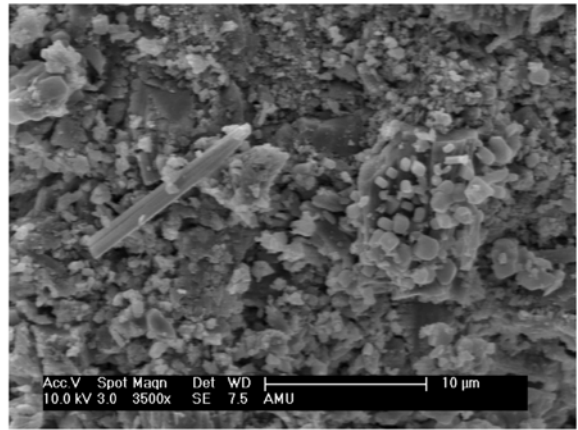
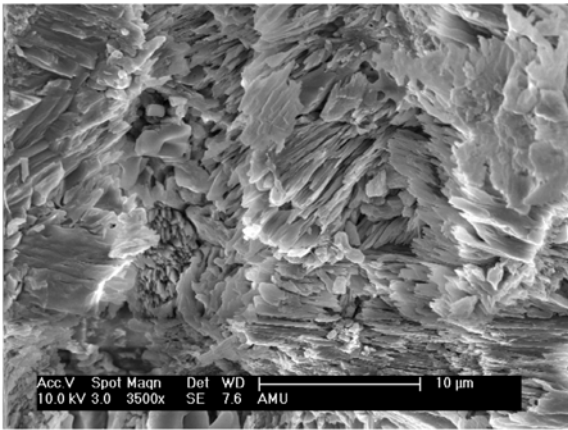


Beachrockprobe Alifinolu 2

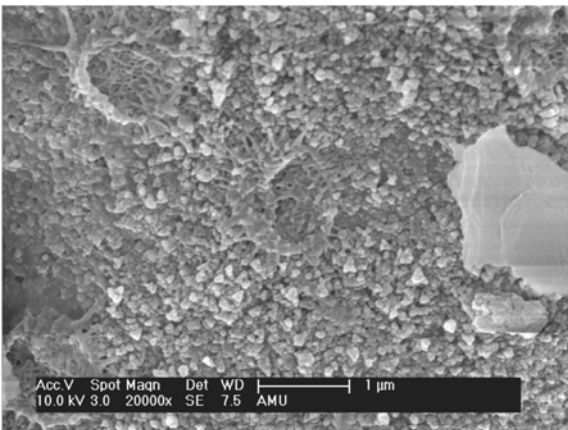


Tafel 1: Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie; Beachrockproben Winnikawandu 1 Lagune, Alifinolu 1 und Alifinolu 2

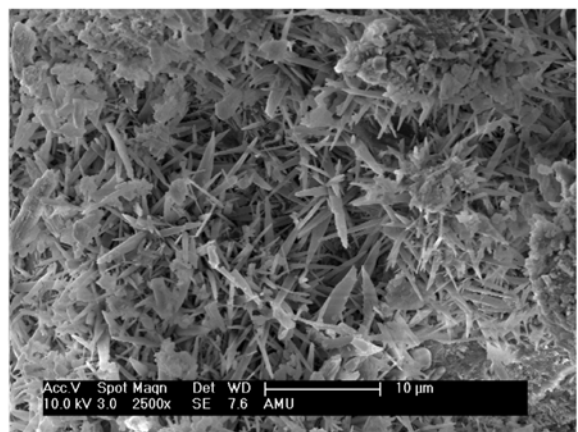
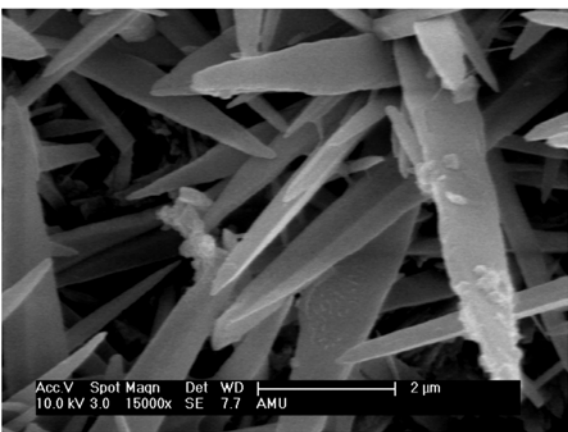
Beachrockprobe Lately Rock



Beachrockprobe Lohifushi 5

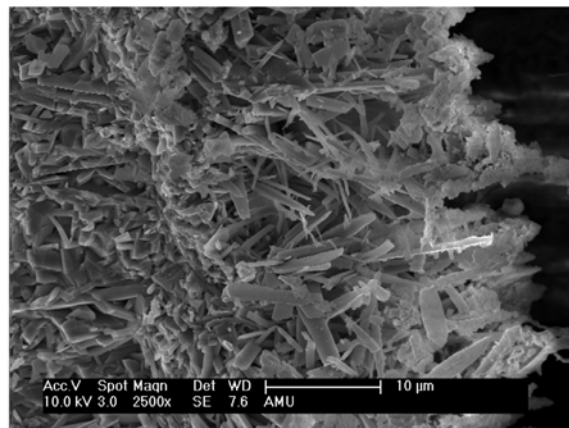
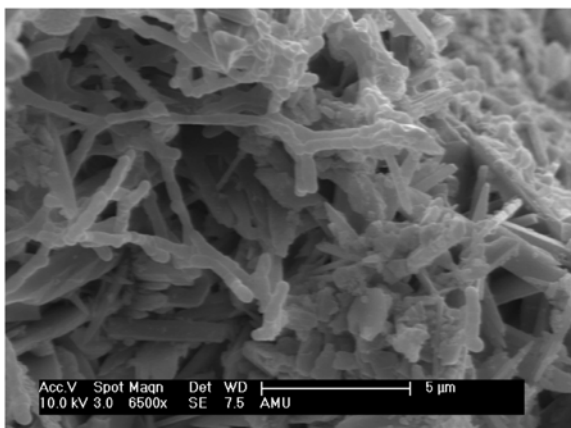


Beachrockprobe Hembadoo 1a

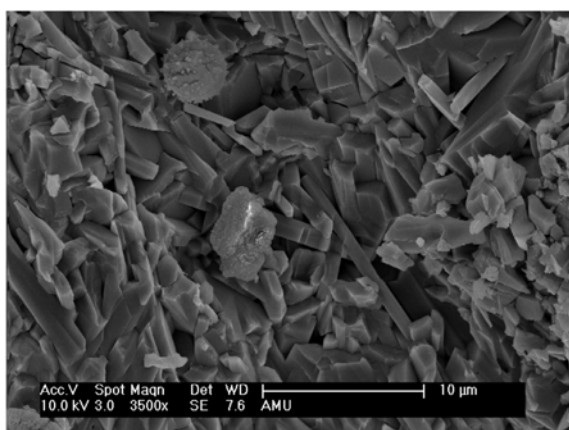
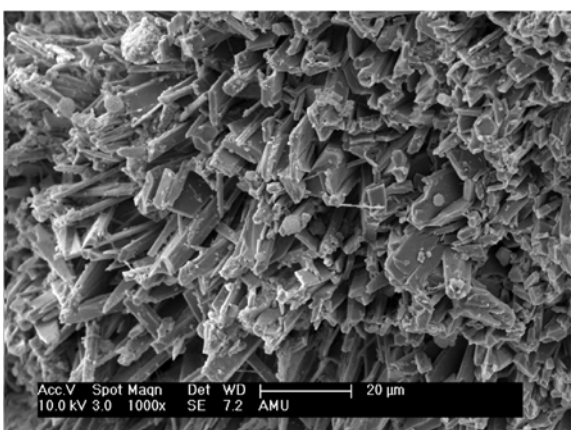


Tafel 2: Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie; Beachrockproben Lately Rock, Lohifushi 5 und Hembadoo 1a

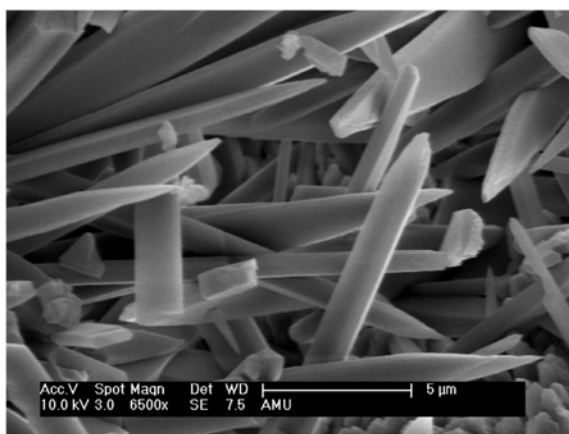
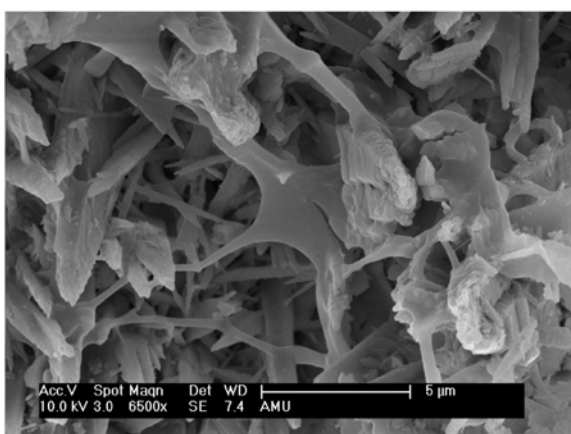
Beachrockprobe Hembadoo 1b



Beachrockprobe Rasfari 1a



Beachrockprobe Rasfari 1b



Tafel 3: Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie; Beachrockproben Hembadoo 1b, Rasfari 1a und Rasfari 1b

5.1.5 Ergebnisse der ICP-Daten Analyse

Die ICP-Werte der Beachrockproben (für S, Fe, Mn, Mg und Ca) wurden zunächst allgemein innerhalb der Testgebiete N, NE & W (geordnet nach den Inseln) mit denen der Sedimentproben verglichen (vgl. Abb. 11, S. 40). Für das Testgebiet SE lagen keine brauchbaren ICP-Werte vor. Weiterhin wurden die Mg-Werte hinsichtlich der Entnahmehöhen der Beachrockproben untersucht und, bezogen auf einzelne Beachrockvorkommen, mit den land- bzw. seewärts entnommenen Sedimentproben verglichen (vgl. Abb. 12, S. 42). Zu Vergleichszwecken wurden eine Beachrockprobe aus Ägypten (Rotes Meer, ca. 20 km südlich Marsa Alam), eine Beachrockprobe aus Tonga (Fafa Island, ca. 5km nördlich Tongatapu), und jeweils eine reine Korallen- bzw. Muschelschalenprobe mit in die Analyse aufgenommen.

Der durch Zweit- und Wiederholungsproben ermittelte Messfehler lag bei durchschnittlich 0,97 %, für Magnesium bei maximal 1,41 %. Der größte Messfehler tauchte mit 2,61 % beim Schwefel auf.

Die Schwefelwerte aller analysierten Proben liegen, mit einer Ausnahme, zwischen ca. 3.500 und 5.000 mg/kg (vgl. Abb. 11a), ohne dass dabei erkennbare Unterschiede zwischen Beachrock und Sediment bzw. zwischen den Testgebieten auftreten.

Bei Mangan zeigt sich wie bei Schwefel eine relative Übereinstimmung zwischen den Sediment- und Beachrockwerten. Eine Ausnahme bildet hierbei nur die Beachrockprobe aus Tonga, die mit fast 50 mg/kg Mangan (vgl. Abb. 11b) sehr deutlich über den anderen Werten liegt. Auffallend ist, dass die Werte für das nördliche Testgebiet, also für die Insel Olahali (für das Vorkommen auf Kagi liegen keine Daten vor), mit Manganmengen von 9 bis knapp 15 mg/kg sehr eng beieinander liegen, wohingegen in den übrigen Testgebieten mit Werten zwischen 9 und ca. 27 mg/kg eine relativ große Streuung vorliegt.

Die Eisengehalte (vgl. Abb. 11c) schwanken zwischen 3 und 187 mg/kg, liegen jedoch zum Großteil zwischen 3 und 60 mg/kg, wie beim Schwefel ohne erkennbare Tendenzen hinsichtlich der Werte der Beachrockproben im Vergleich zu den Sedimentproben bzw. zwischen den Testgebieten.

Die geringste Streuung, für Sediment und Beachrock, zeigen die Werte für Calcium (vgl. Abb. 11d). Sie liegen, wie die Referenz-Beachrockproben, zwischen 417.487 und 296.218 mg/kg. Auffallend sind hierbei die sehr hohen Werte für die Korallen- bzw. Muschelprobe von über 700.000 mg/kg.

Die größte Streuung zeigen die Magnesiumgehalte (vgl. Abb. 11e) mit Werten zwischen 3208 und 12936 mg/kg. Dabei ist eine leichte Tendenz dahingehend fest zu stellen, dass die Sedimentproben die größeren Werte enthalten.

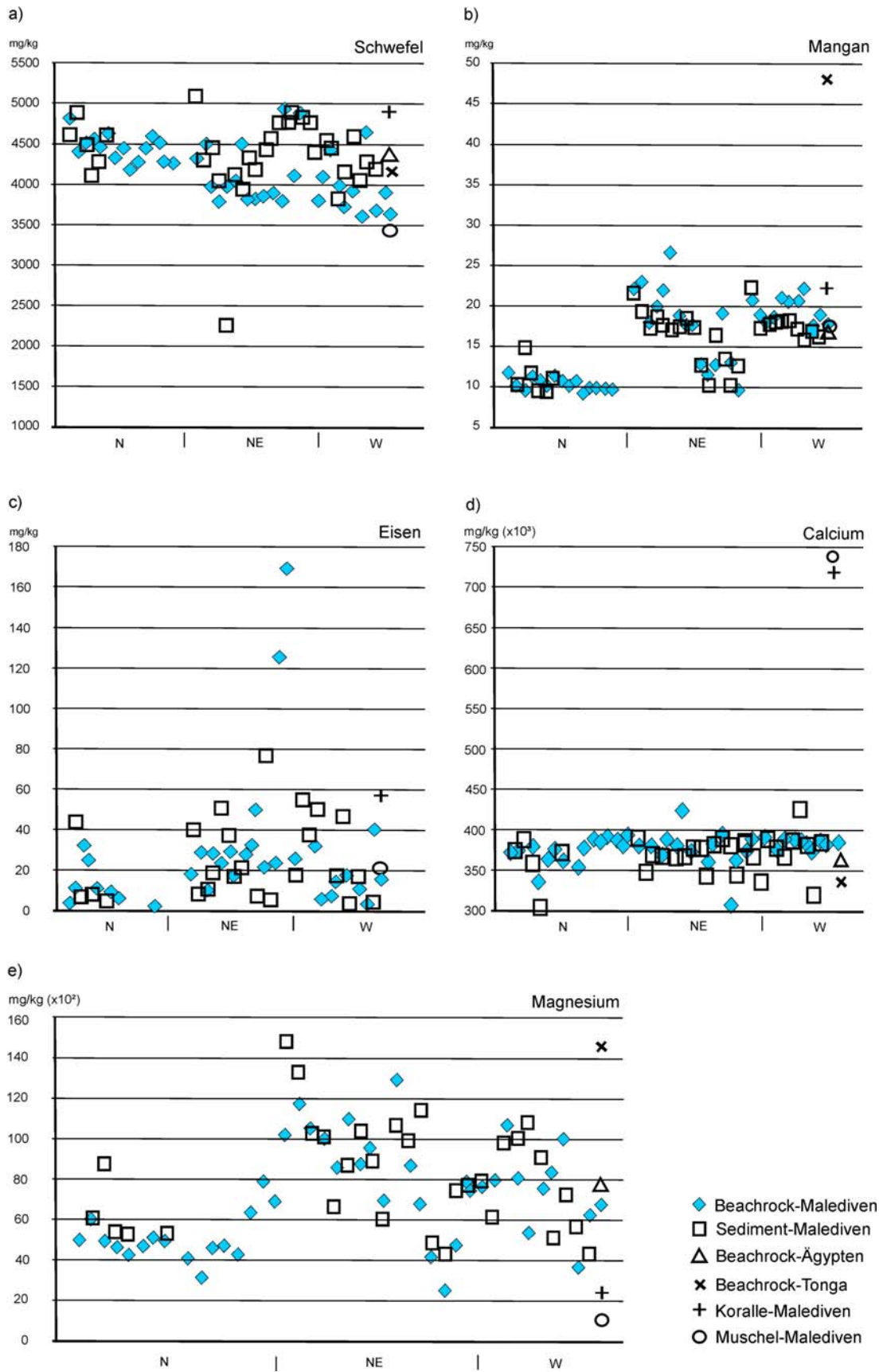


Abbildung 11: Chemische Zusammensetzung der Beachrock- und Sedimentproben (aufgeschlüsselt nach Testgebieten)

Auffallend bei den Magnesium-Werten sind die sehr geringen Gehalte der Muschel- und Korallenproben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sowohl die Korallen- als auch Muschelgehäuse überwiegend aus Aragonit aufgebaut sind, welcher kein Magnesium in sein Kristallgitter einbaut. Da die Magnesium-Werte für die Sedimente, die zum Großteil aus Korallen- bzw. Muschelbruch bestehen, jedoch deutlich darüber liegen, liegt der Schluss nahe, dass eine Umwandlung des Aragonit in Calcit bereits während der Aufarbeitung des Sedimentes auf dem Riffdach bzw. im Strandbereich stattfindet. Somit entstammt der Aragonitanteil der Beachrockmatrix größtenteils nicht dem Ausgangssediment.

Wie aus Abbildung 12 Teil a ersichtlich steht der Magnesiumgehalt der Beachrockproben in keinem Zusammenhang mit der Entnahmehöhe. Darüber hinaus zeigt sich (vgl. Abb. 12 Teil b), dass keine eindeutige Anreicherung von Magnesium in den Beachrockproben gegenüber den jeweiligen Sedimenten, welche auf das Vorhandensein von Hoch-Magnesium Calcit schließen lassen würde, vorliegt.

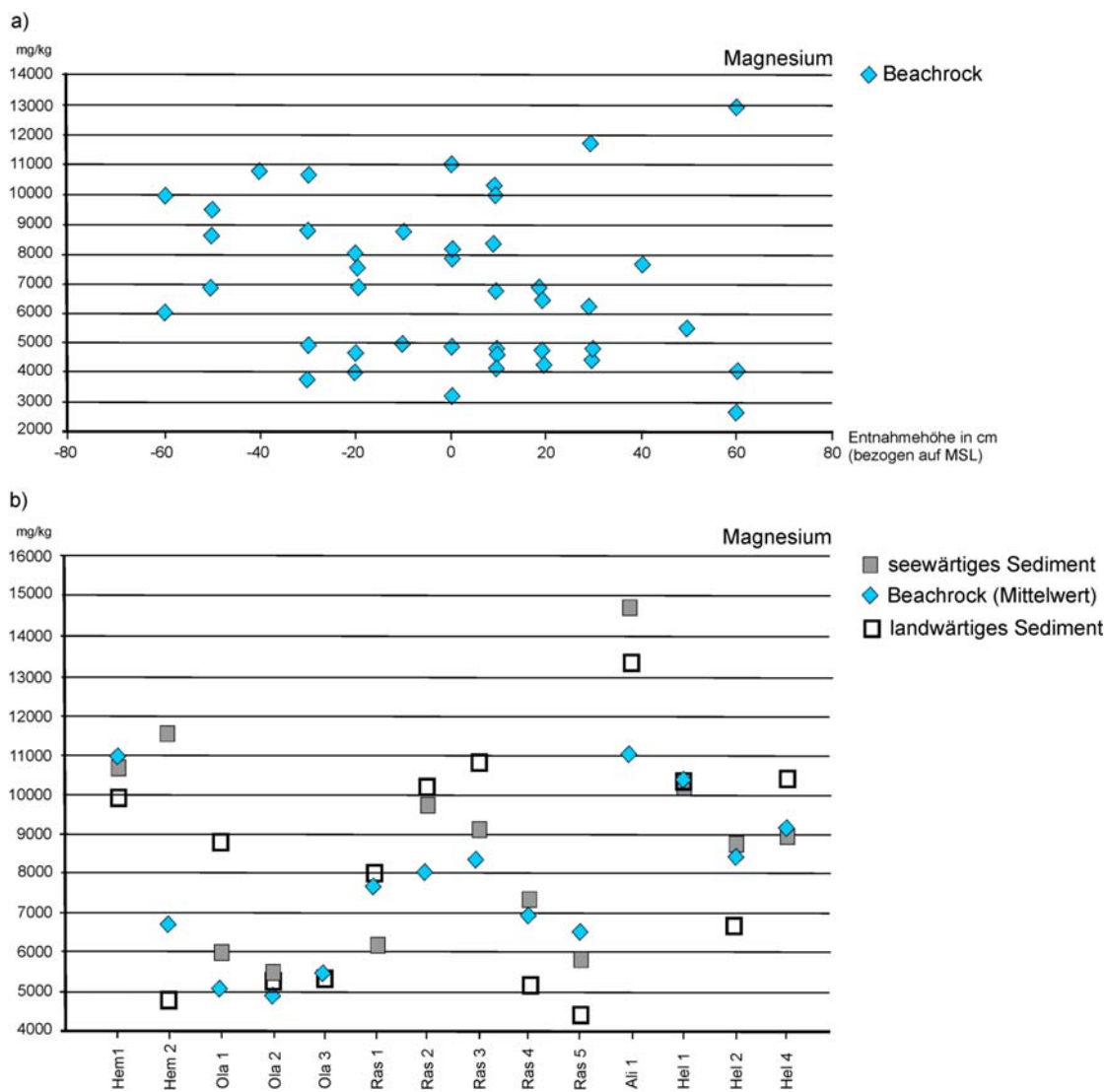


Abbildung 12: Magnesiumgehalte der Beachrockproben: a) nach Entnahmehöhe der Proben und b) im Vergleich zu den jeweiligen Sedimentproben

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zum einen die Beachrockvorkommen und das land- und seewärtige Sediment in Bezug auf ihre chemische Zusammensetzung keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Zum anderen ist festzustellen, dass der Magnesium-Gehalt des Beachrock keine Anreicherung gegenüber dem Sediment vorweist, und von der Entnahmehöhe unabhängig ist. Somit hat die rezente Lage zum mittleren Meeresspiegel keinen Einfluss auf die Zementzusammensetzung. Dies bestätigt wiederum die Ergebnisse der Dünnschliffauswertung und Rasterelektronenmikroskopie. Weiterhin ist festzuhalten, dass der Aragonitanteil der Matrix zum Großteil exogener Natur ist, und nicht dem Ausgangsmaterial entspringt.

5.1.6 Ergebnisse der Korngrößenanalysen

Das Korngrößenspektrum innerhalb aller Beachrockproben reicht von feinsandigen, knapp unter 1 mm großen, bis hin zu kiesigen Fraktionen mit einer maximalen Kantenlänge von ca. 6 cm. Vor Ort wurden in den Beachrockvorkommen jedoch auch größere Korallenbruchstücke bzw. Muschelschalen mit Kantenlängen von zum Teil über 30 cm vorgefunden. Feinere, tonige bzw. schluffige Körnungen konnten in den Beachrockproben nicht als solche erkannt werden.

Die einzelnen Proben, also Niveaus der Beachrockvorkommen, weisen unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich ihrer Korngrößenzusammensetzung auf (vgl. Tafeln 4 bis 9, S. 49 ff). Diese reichen von sehr homogenem, meist feinsandigem (Bild 6), bis hin zu heterogenem Aufbau mit dem gesamten Korngrößenspektrum (Bild 7).



Bild 6: Detailaufnahme Probe Ola 3-4
(Insel Olahali, Testgebiet Nord)



Bild 7: Detailaufnahme Probe Mon 1b
(Insel Monifinolu, Testgebiet Südost)

Für die Auswertung der Korngrößen Daten hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Niveaus, zum land- bzw. seewärtigen Sediment und der Zuordnung zu einer bestimmten Entnahnehöhe wurden fünf Korngrößenklassen gebildet:

Korngrößenklasse 1 Korngrößen kleiner 2 mm

Korngrößenklasse 2 Korngrößen zwischen 2 mm und 5 mm

Korngrößenklasse 3 Korngrößen größer 5 mm bis 10 mm

Korngrößenklasse 4 Korngrößen größer 10 mm bis 20 mm

Korngrößenklasse 5 Korngrößen größer 20 mm

Um die Anteilstendenzen unter den Klassen darstellen zu können, wurden vier Anteilsgruppen unterschieden:

Anteilsgruppe 1 Anteil der Korngrößen unter 10 %

Anteilsgruppe 2 Anteil der Korngrößen zwischen 10 % und 50 %

Anteilsgruppe 3 Anteil der Korngrößen über 50 %

Anteilsgruppe 4 Anteil der Korngrößen über 75 %

Über die Korngrößenklassen und die Anteilsgruppen können die Korngrößenspektren graphisch erfasst und ausgewertet, und somit die Beachrock- bzw. Sedimentproben verglichen werden.

Wie aus Abbildung 13 (S. 45) ersichtlich, können die Beachrockvorkommen keiner einheitlichen Korngrößenverteilung zugeordnet werden. Ebenso wenig lassen sich die Korngrößenverteilungen der Beachrockvorkommen mit denen der land- bzw. seewärtigen Sedimente in Beziehung bringen. So sind zum einen die see- und landwärtigen Sedimente teilweise deutlich voneinander verschieden, zum anderen ist ihre Zusammensetzung sowohl gröber als auch feiner als die der entsprechenden Beachrocks (z.B. Vorkommen Helengeli 4). Lediglich Vorkommen Helengeli 5 zeigt die gleiche Korngrößenzusammensetzung wie das landwärts bzw. seewärts entnommene Sediment. Die unterschiedliche Zusammensetzung des Beachrocks zeigt sich dabei nicht nur zwischen den Vorkommen innerhalb der einzelnen Testgebiete sondern auch zwischen den einzelnen Vorkommen auf den Inseln (vgl. Abb.16, S. 48). Darüber hinaus sind auch innerhalb der einzelnen Niveaus der Beachrockvorkommen Unterschiede in der Korngrößenzusammensetzung festzustellen (vgl. Abb.14, S. 46).

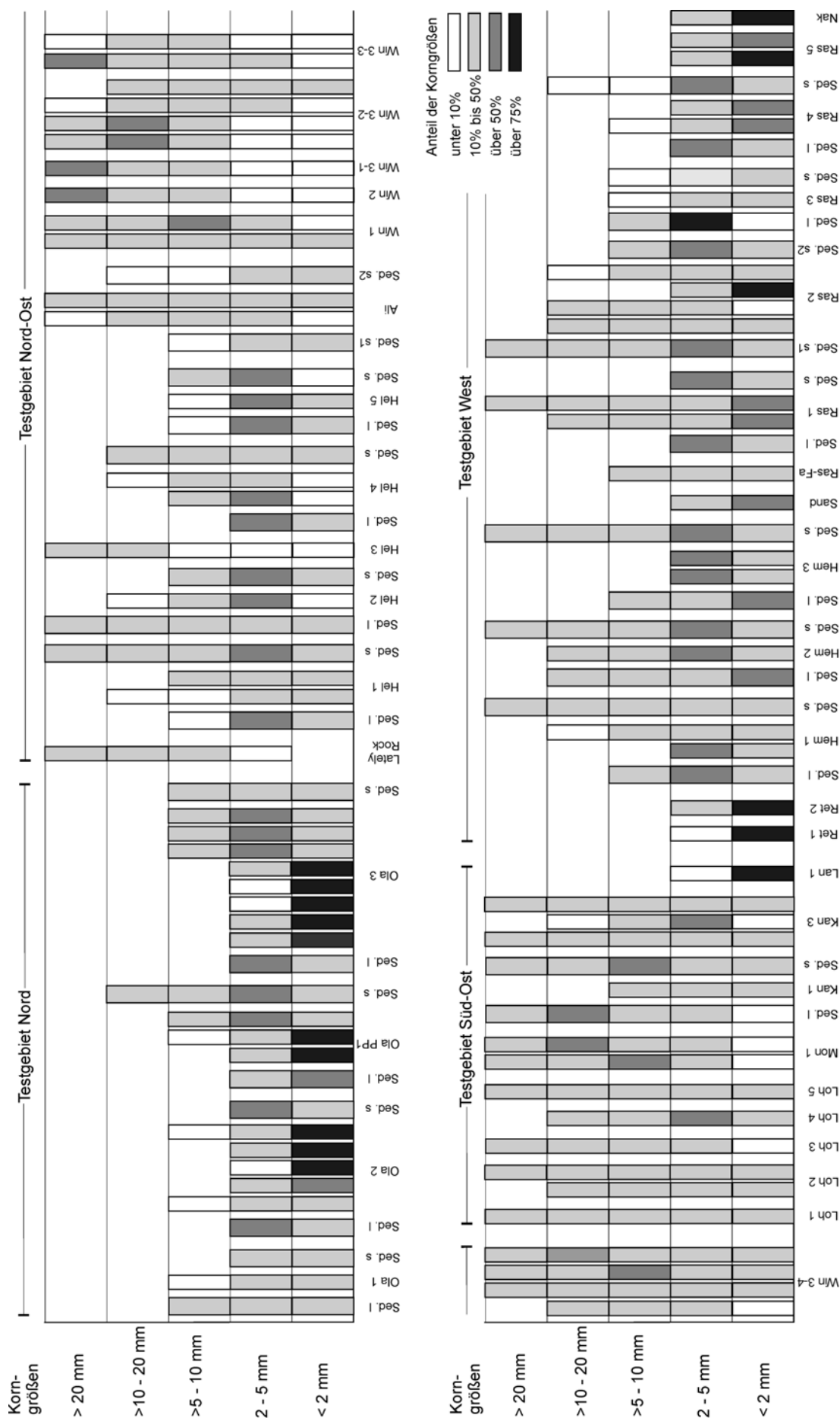


Abbildung 13: Korngrößenpektren der Beachrockvorkommen und Sedimente (Sed. s = seewärtige Sedimentprobe, Sed. l = landwärtige Sedimentprobe)

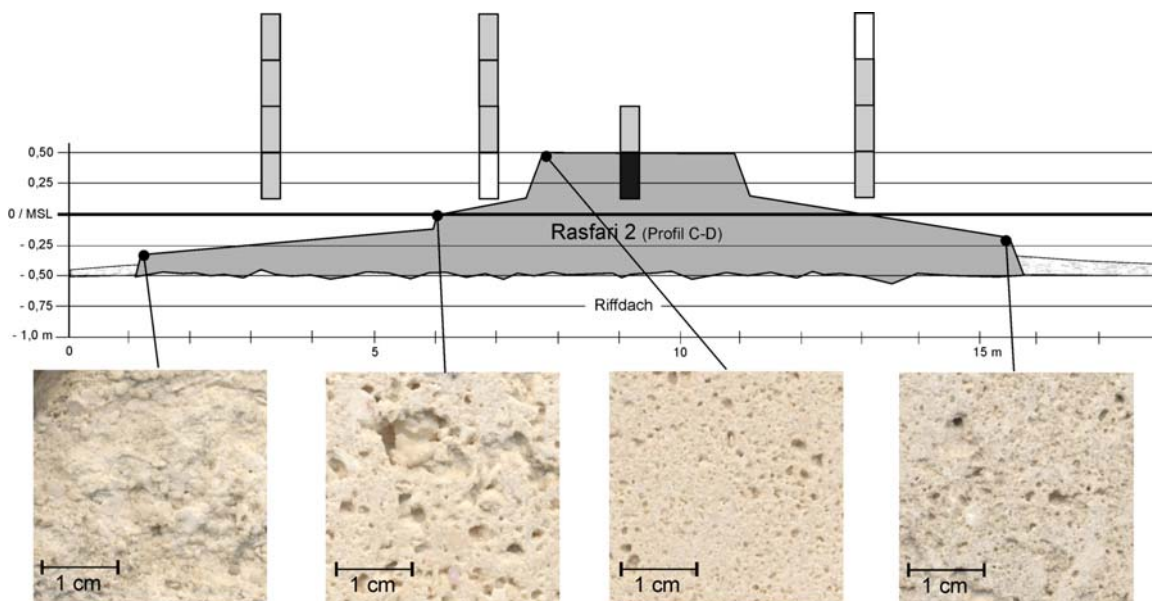


Abbildung 14: Korngößen innerhalb des Beachrockvorkommen Rasfari 2 (Testgebiet West)

Betrachtet man die Korngößen der Beachrockvorkommen hinsichtlich der Entnahmehöhe der Proben, so ist zu erkennen, dass weder eine generelle Verschiebung des Korngößenspektrums in Abhängigkeit der Höhenlage, noch eine Übereinstimmung innerhalb der Proben einer Entnahmehöhe vorliegt. Die zum Beispiel bei ca. +10 cm über dem mittleren Meeresspiegel entnommenen Proben weisen sowohl einen sehr feinen, homogenen Charakter mit Korngößen unter 5 mm (dabei oftmals mit Anteilen von über 75 % unter 2 mm) als auch einen sehr heterogenen Aufbau mit dem ganzen Korngößenspektrum (vgl. Abb. 15) auf. Allgemein lässt sich feststellen, dass (mit Ausnahme der Probe Lately Rock) in allen Beachrocks die Fraktionen unter 2 mm vorhanden sind und im Gesamten betrachtet die Korngößen unter 5 mm anteilmäßig dominieren, wohingegen größere Körnungen über 10 mm häufig fehlen.

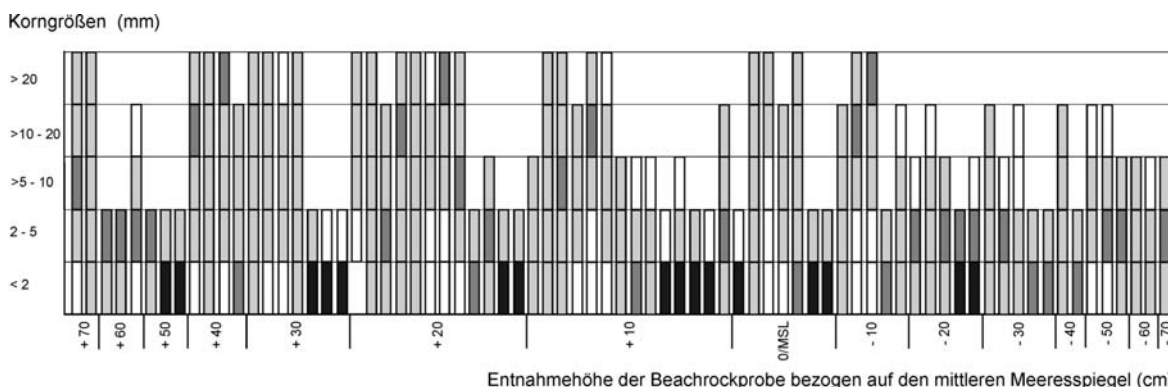


Abbildung 15: Korngößen der Beachrockvorkommen aufgeschlüsselt nach Entnahmehöhen

Eine Zonierung der Korngrößen lässt sich jedoch hinsichtlich der Testgebiete ermitteln. So finden sich im nördlichen Testgebiet mit z. B. den Beachrocks Olahali 2 und Olahali 3 durchwegs Vorkommen mit sehr feinen Körnungen, im nordöstlichen und südöstlichen mit eher gröberen Zusammensetzungen wie die Vorkommen am Fundort Winnikawandu oder auf der Insel Lohifushi (vgl. Abb. 16, S. 48). Die einzige Ausnahme bildet im südöstlichen Testgebiet das Vorkommen auf Lankanfushi, welches jedoch zum Atollinneren exponiert liegt, wohingegen alle anderen mehr oder weniger stark Atollrand-exponiert zu finden sind. Testgebiet West zeigt einen eher durchmischten Charakter mit sehr feinen (z.B. die Beachrocks auf Rethiraa) sowie gemischten Vorkommen wie auf der Insel Rasfari, wobei auch in diesem Fall noch auf die jeweiligen Expositionen einzugehen ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass zum einen die Beachrockvorkommen keinem einheitlichen Korngrößenspektrum zugeordnet werden können, zum anderen keine direkten Beziehungen zwischen der Korngrößenzusammensetzung der Beachrockvorkommen und der Sedimente vorliegen. Ebenso wenig zeigt sich eine Zuordnung innerhalb der Inseln oder zur Entnahmhöhe. Selbst innerhalb der einzelnen Niveaus der Beachrockvorkommen zeigen sich Unterschiede in der Korngrößenzusammensetzung. Allerdings sind Unterschiede im Korngrößenspektrum zwischen den einzelnen Testgebieten zu erkennen, was auf einen Einfluss der Exposition bzw. der topographischen Lage schließen lässt.

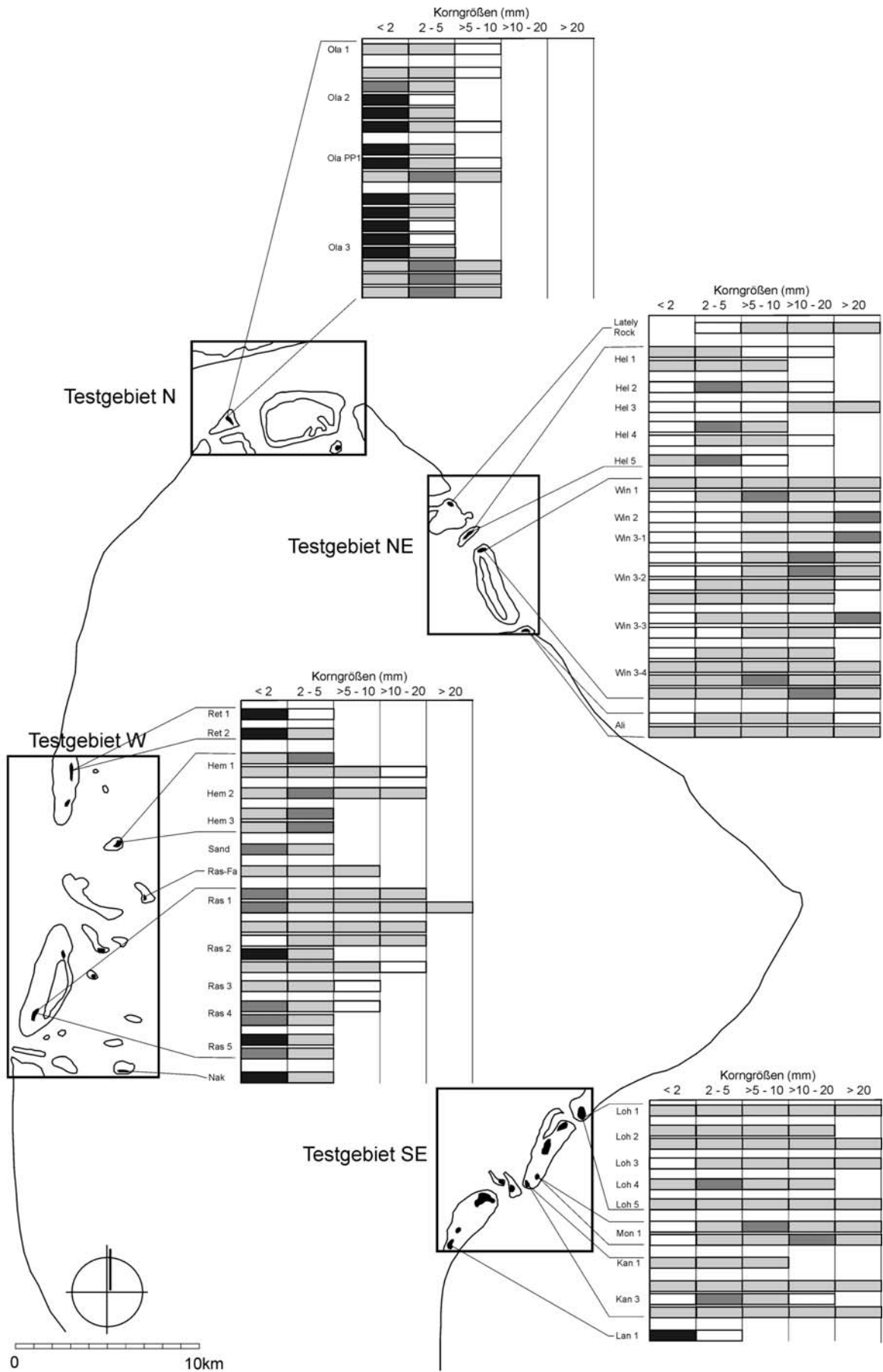


Abbildung 16: Korngrößenpektren der Beachrockvorkommen in den Testgebieten



Ola 1



Ola 2-1



Ola 2-2



Ola 2-3



Ola 2-4



Ola 2-5



Ola 3-1



Ola 3-2



Ola 3-3



Ola 3-4



Ola 3-5



Ola 3-6

Tafel 4: Detailaufnahmen Beachrockproben Insel Olahali, Vorkommen Olahali 1, 2 & 3, Testgebiet Nord, Maßstab 1:1



Ola 3-7



Ola 3-8



Lately Rock



Hel 1a



Hel 1b



Hel 2



Hel 3



Hel 4a



Hel 4b



Hel 5



Ali 1



Ali 2

Tafel 5: Detailaufnahmen Beachrockproben Insel Olahali, Vorkommen Olahali 3, Proben 3-7 & 3-8, Testgebiet Nord; Insel Helengeli, Vorkommen 1 bis 5, und Fundorte Lately Rock & Alifinolu, Testgebiet Nordost; Maßstab 1:1.



Win 1 Kanal



Win 1 Lagune



Win 2



Win 3-1



Win 3-2a



Win 3-2b



Win 3-2c



Win 3-2d



Win 3-3a



Win 3-3b



Win 3-4a



Win 3-4b

Tafel 6: Detailaufnahmen Beachrockproben Fundort Winnikawandu Vorkommen 1, 2 & 3, Testgebiet Nordost, Maßstab 1:1.



Win 3-4c



Win 3-4c Kanal



Win 3-4d



Loh 1



Loh 2a



Loh 2b



Loh 3



Loh 4



Loh 5



Mon 1a



Mon 1b



Lan 1

Tafel 7: Detailaufnahmen Beachrockproben Fundort Winnikawandu Vorkommen 3, Proben 3-4c bis 3-4d; Insel Lohifushi Vorkommen 1 bis 5; Insel Monifinolu Vorkommen1 und Insel Lankanfushi Vorkommen 1; Testgebiet Nordost, Maßstab 1:1.



Kan 1



Kan 3a



Kan 3b



Kan 3c



Sand



Ret 1



Ret 2



Ras 1a



Ras 1b



Ras 2a



Ras 2b



Ras 2c

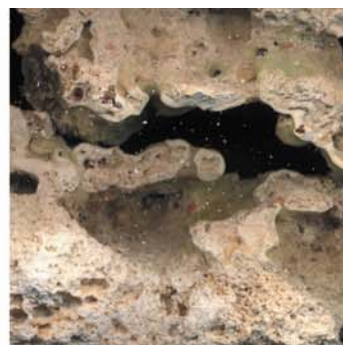
Tafel 8: Detailaufnahmen Beachrockproben Insel Kanuhura Vorkommen 1 und 3, Testgebiet Nordost; Insel Rethiraa Vorkommen 1 & 2; Insel Rasfari Vorkommen 1 & 2a bis c, Testgebiet West; Maßstab 1:1.



Ras 2d



Ras 3



Ras 4a



Ras 4b



Ras 5-1



Ras 5-2



Rasfa



Nak



Hem 1a



Hem 1b



Hem 2



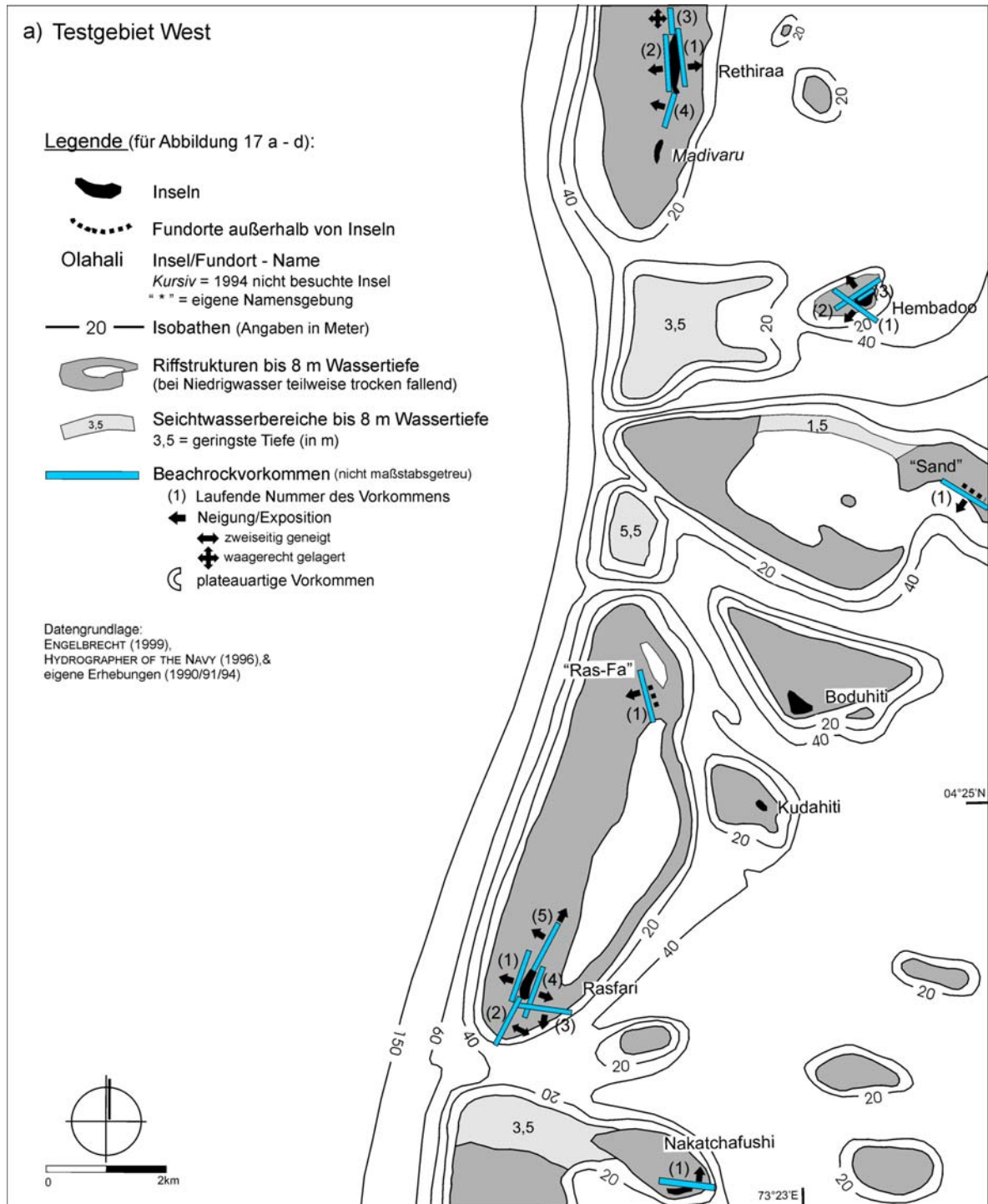
Hem 3a

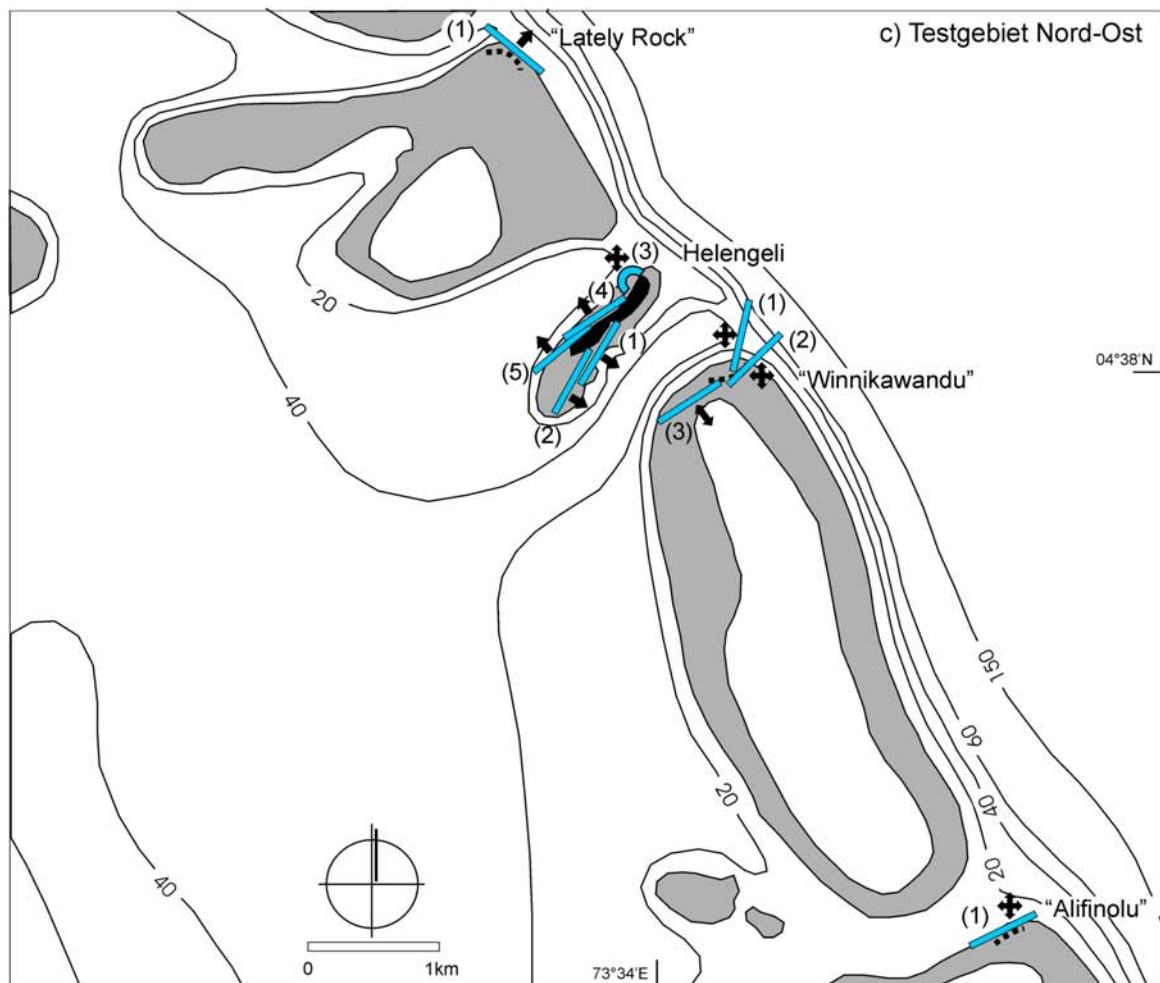
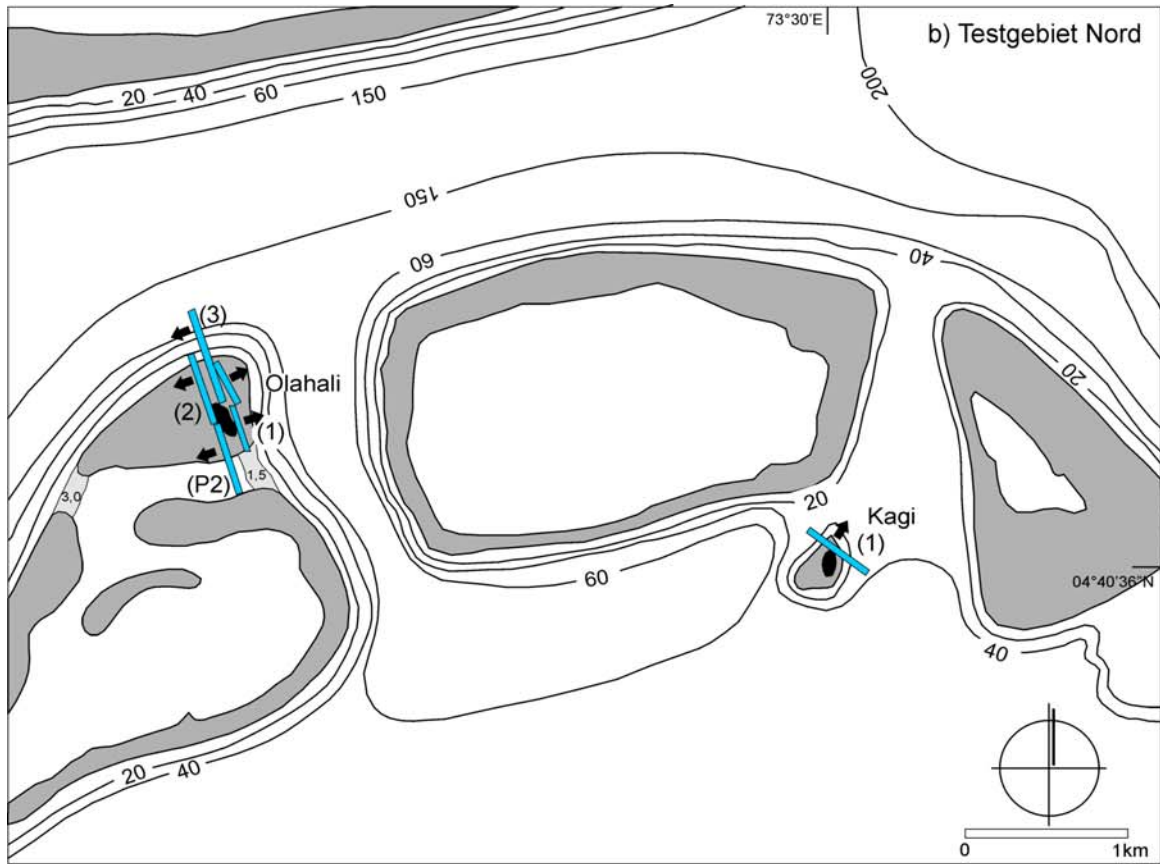
Tafel 9: Detailaufnahmen Beachrockproben Insel Rasfari Vorkommen 2d, 3,4 & 5; Fundorte Rasfa & Sand, Insel Nakatchafush Vorkommen 1 und Insel Hembadoo Vorkommen 1, 2 & 3; Testgebiet West; Maßstab 1:1.

5.2 Ergebnisse der topographisch-morphologischen Untersuchungen

5.2.1 Übersicht über Bathymetrie und Morphologie in den Testgebieten

Die folgende Abbildung 17 gibt neben den bathymetrischen und morphologischen Verhältnissen die topographische Lage und Neigung bzw. Exposition der Beachrockvorkommen in den einzelnen Testgebieten wieder. Genauere Darstellungen der einzelnen Vorkommen finden sich in den Inselkarten und Lageskizzen im Anhang.





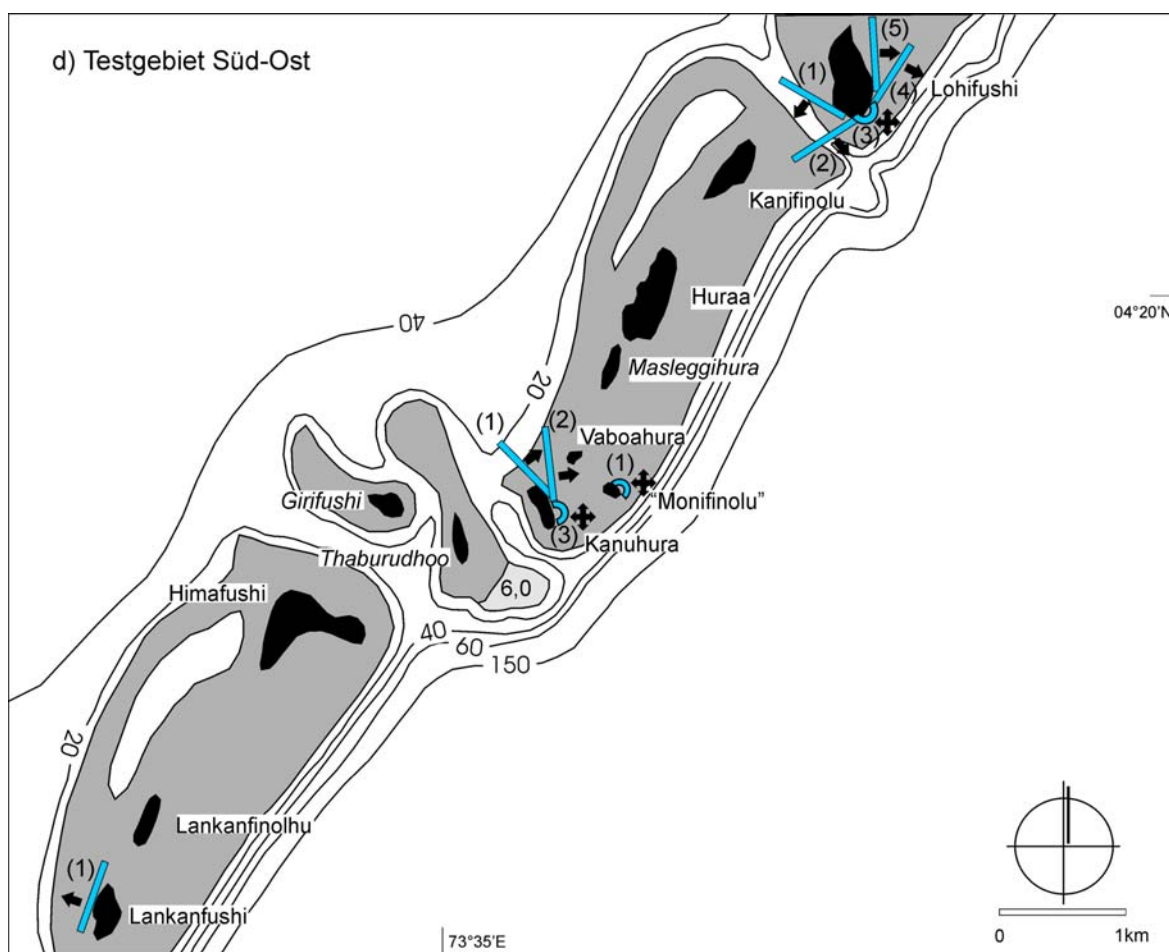


Abbildung 17: Übersicht über die bathymetrischen und morphologischen Verhältnisse in den Testgebieten

5.2.2 Exposition und topographische Lage

Die grundlegende Überlegung bei der Betrachtung von Exposition und topographischer Lage sowohl der Beachrockvorkommen und als auch der Inseln war die, dass die einzige Energieform im Korallenarchipel der Malediven, die zur Anhäufung von Sediment über den Meeresspiegel in der Lage ist, die (durch Wind initiierte) Welle darstellt. Nur durch entsprechende Wellendynamik kann Sediment von den Riffdächern (das einzige ursprüngliche Liefergebiet) bzw. Lagunenböden aufgenommen und wiederum auf den einzelnen Riffstrukturen abgelagert werden. Dabei sind v. a. jene Wellen von Bedeutung, die sich gegenüber den von den „normalen“ monsonalen Verhältnissen gebildeten Wellen durch höhere Energien und/oder andere Setzrichtungen unterscheiden. Der direkte Windeinfluss spielt rezent für die Sedimentakkumulation eher eine untergeordnete Rolle, da die potentiellen Sedimentliefergebiete rezent nie ganz austrocknen, was für eine Lockersedimentverlagerung durch Wind Voraussetzung wäre.

Betrachtet man zunächst die Expositionen der Beachrockvorkommen, so können vier Typen unterschieden werden: zum einen Vorkommen, die zum Atollrand hin exponiert sind, zum zweiten Vorkommen, die zu den Kanälen exponiert liegen und zum dritten Vorkommen, die zur Atolllagune hin exponiert sind. Einen vierten Typ bilden Vorkommen, die sowohl atollrand- als auch kanalexponiert liegen (vgl. Abb. 17; z.B. Fundort „Alifinolu“, Testgebiet NE). Dabei zeigt sich, dass der Großteil der Vorkommen eine Exposition zum Atollrand (ca. 50 %), gefolgt von Vorkommen in Kanalexposition (ca. 25 %), aufweist (vgl. Tab. 3). Eine Lagunenexposition tritt nur im Testgebiet West signifikant in Erscheinung.

Tabelle 3: Expositionstypen der Beachrockvorkommen

Testgebiete	Nord	Nord-Ost	Süd-Ost	West	gesamt
Atollrandexponiert	3	6	8	7	24
Kanalexponiert	3	7	1	1	12
Atollrand/Kanalexponiert.	-	2	-	3	5
Lagunenexponiert	-	-	1	5	6

(zweifache Expositionen und nicht genau zuordenbare waagerechte Lagerungen sind jeweils zweimal aufgeführt)

Untersucht man die Beachrockvorkommen hinsichtlich ihrer Exposition zu den auf das Atoll auflaufenden Winden (vgl. Abb. 18) und den daraus resultierenden Wellen zeigt sich, dass knapp 50 % westlich bzw. nordwestlich exponiert liegen, was sich mit den südwest-monsunalen Windverhältnissen mit überwiegenden Winden aus W bis NW deckt.

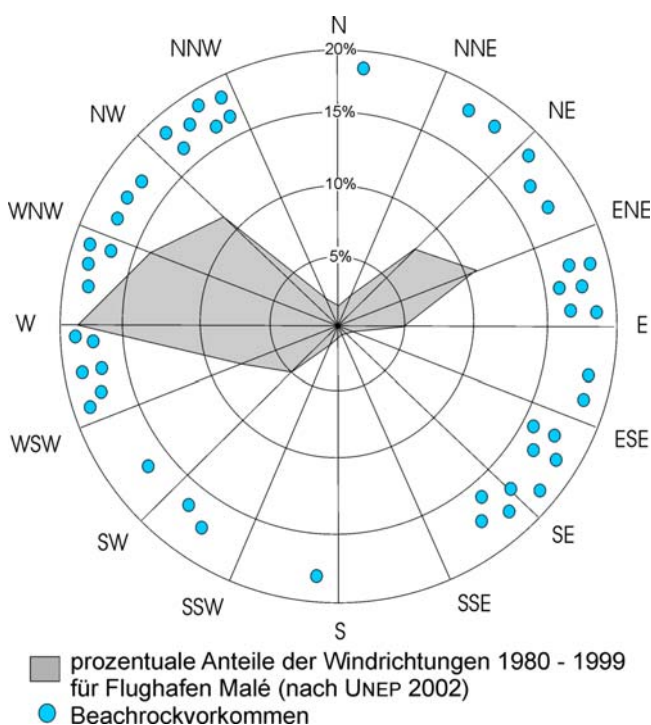


Abbildung 18: Expositionen der Beachrockvorkommen in Bezug auf die vorherrschenden Windverhältnisse

Expositionen zu den Sektoren der nordost-monsunalen Verhältnisse mit Winden aus NE bis ENE zeigen jedoch nur 8% der Beachrockvorkommen. Dagegen liegen mit 36 % über ein Drittel der Vorkommen östlich bis südöstliche exponiert. Südliche und nördliche Expositionen finden sich kaum.

Schlussfolgernd aus dem Vorangegangenen lässt sich feststellen, dass die Expositionen der Beachrockvorkommen, wie auch die Lagen der Inseln, nur bedingt mit den monsunal wirkenden Kräften zu vereinbaren sind. Vielmehr haben einzelne, außerhalb der „normalen“ monsunalen

Zyklen auftretende Wind-/Wellenereignisse in Kombination mit den morphologischen Strukturen, wie die sehr steil aus großen Tiefen bis an die Wasseroberfläche ansteigende Außenriffe oder die Kanäle, den entscheidenden Einfluss auf die Sedimentakkumulation. Dies wird deutlich, wenn man sich die topographischen Lagen der Beachrockvorkommen und Inseln im Gesamten für das Nord-Malé Atoll betrachtet (vgl. Abb. 19).

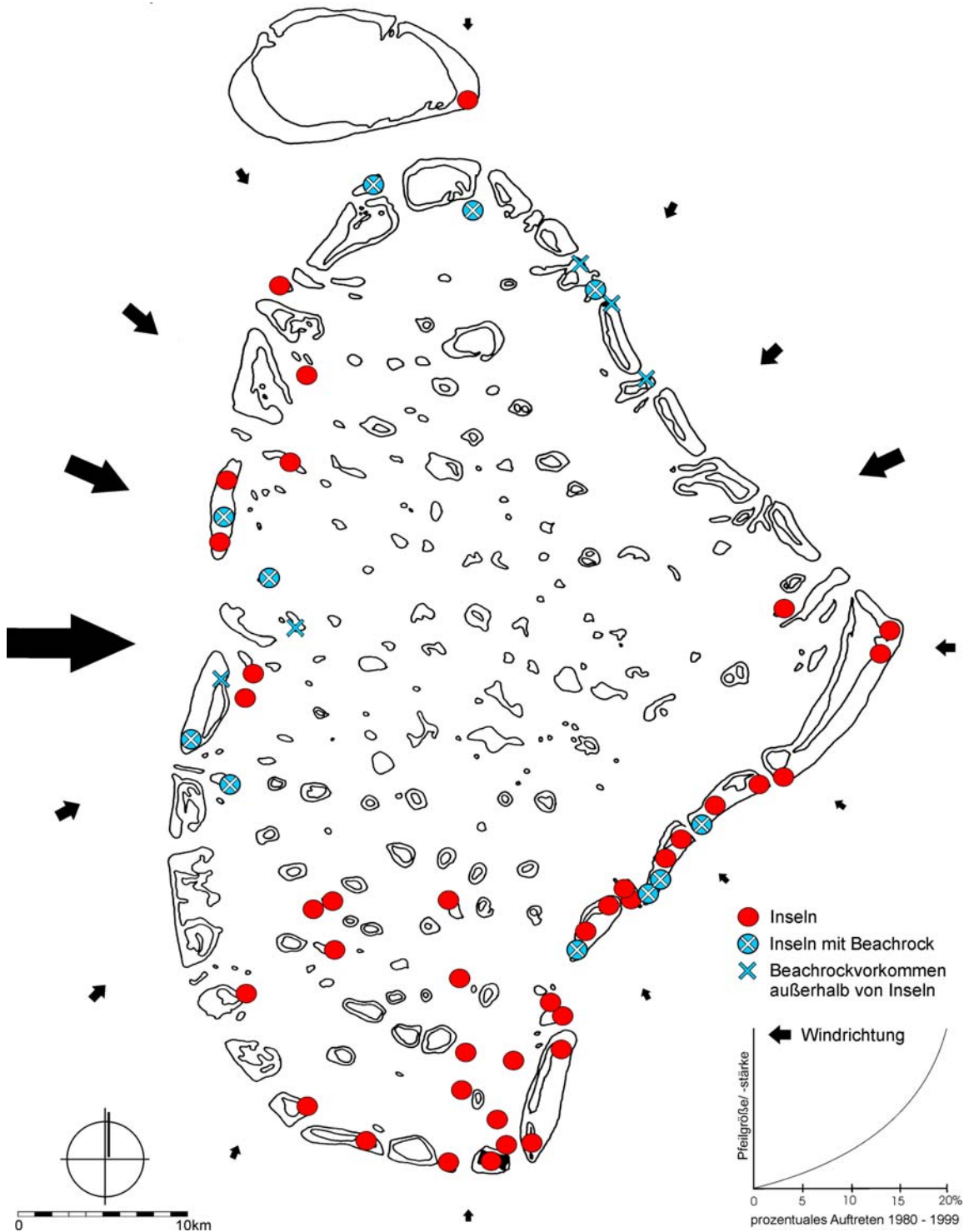


Abbildung 19: Topographische Lage der Inseln und Beachrockvorkommen im Nord-Malé Atoll

Es zeigt sich, dass – mit Ausnahme des südlichen Atollbereiches – die Inseln und Beachrockvorkommen allesamt entweder auf den äußeren Faroringen oder auf Riffstrukturen in den Kanälen liegen. Dabei liegen die Inseln und Beachrockvorkommen im Nordosten und Norden eher auf der Atollrandseite der Faros (dabei immer an deren nördlichen Riffkanten) und bei Kanallage eher in Außenriffnähe, wohingegen im Westen die Inseln bzw. Beachrockvorkommen weiter vom Atollrand entfernt und im Bereich der Kanäle weiter zurückversetzt liegen. Die Kanäle zwischen den Faros im Westen sind darüber hinaus deutlich breiter als die Kanäle im Norden bzw. Nordosten des Atolls. Im Atollinneren konnten während der Forschungsreisen 1990/91 & 94 hier keine Erhebungen über den mittleren Meeresspiegel gefunden werden.

Die für die eben beschriebenen Bereiche herrschenden Gegebenheiten lassen sich prinzipiell recht gut mit den monsunalen Verhältnissen in Einklang bringen. Die hohe Häufigkeit der Winde aus westlicher bzw. nordwestlicher Richtung führt für den westlichen Atollrand nicht nur zu einer verstärkten Sedimentverlagerung auf den Faros in Richtung des Atollinneren, sondern erhöht auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hochenergetischer Wellen. Diese können dann das Sediment von den Riffdächern bzw. aus den Seichtwasserbereichen aufnehmen und entsprechend auf den Riffstrukturen wieder ablagern. Für die höhere Auftretswahrscheinlichkeit spricht auch die gegenüber dem Norden bzw. Nordosten des Atolls größere Anzahl an Inseln bzw. Beachrockvorkommen. Die geringere Anzahl im Norden und Nordosten lässt sich, generell nach obiger Argumentation somit mit einer geringeren Häufigkeit von Winden aus nördlicher bis nord-nordöstlicher Richtung bzw. mit geringeren Wind-/Wellenenergien erklären.

Die Verhältnisse im südlichen und südöstlichen Atollbereich lassen sich nur bedingt mit obiger Argumentationskette darstellen. Die Inseln im Südosten liegen zwar wie im Nordosten tendenziell auf der Atollrandseite der Faros und bei Kanallage in Außenriffnähe, sind jedoch in höherer Anzahl vorhanden und im Durchschnitt deutlich größer als die Inseln im übrigen Atoll (das östlichste Faro beherbergt an seiner Ostspitze die beiden größten, natürlichen Inseln des Nord-Malé Atolls). Dies, obgleich östliche bis südöstliche Winde nur sehr selten auftreten. Im südlichen Atollbereich liegen generell die meisten Inseln, dabei ein Großteil weit im Atollinneren in Verlängerung von Kanälen, obwohl die südlichen bis südwestlichen Winde, ebenso wie im Südosten, nur mit sehr geringer Häufigkeit auftreten. Die Inseln im Süden bergen – augenscheinlich – keine Beachrockvorkommen (vgl. Abb. 19, S. 59). Es muss davon ausgegangen werden, dass Vorkommen vorhanden waren, jedoch das Material zu Bauzwecken (v. a. Stadt und Flughafen Malé) entnommen wurde, wie an vielen Bauwerken deutlich zu erkennen ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Insel- und Beachrockbildung bevorzugt auf den, den Atollrand bildenden Faros und auf Riffstrukturen in den Kanälen bzw. in deren Verlängerung stattfindet.

In erstem Falle trifft die über den freien Ozean ziehende Welle abrupt auf die Riffkante und wird dabei sofort energetisch wirksam. Im zweiten Fall kommt es durch die submarinen Reliefverhältnisse, im Besonderen durch das Ansteigen des Meeresbodens und der Verkleinerung des Durchflussquerschnittes, zu einer Art „Tunneleffekt“, welcher zum Ansteigen der Wellenhöhe und zum weiteren Vordringen der Welle ins Atollinnere führt.

Die Bevorzugung der Atollrand- und/oder Kanallagen zeigt sich auch in den Expositionsverhältnissen der Beachrockvorkommen. Dies kann jedoch nur bedingt durch die monsunalen Verhältnisse erklärt werden. Vielmehr sind hochenergetische Einzelereignisse in Kombination mit den submarinen Reliefgegebenheiten Auslöser für eine Initiale Sedimentablagerung und bilden somit die Grundlage für eine Insel- bzw. Beachrockbildung. Solche, aus beliebigen Richtungen auf das Atoll auftreffenden, Wellenereignisse klären auch die Lagunenexpositionen bzw. Lee-Lagen (auf Inseln) einiger Beachrockvorkommen.

5.2.3 Größe, Höhenlage und Mächtigkeit

Bei der Geländeaufnahme der Beachrockvorkommen wurden deren mittlere Breiten und Längen sowie die mittlere Höhe und Tiefe der Beachrockoberflächen (vgl. Abb. 20), bezogen auf den mittleren Meeresspiegel ermittelt. Zusätzlich konnte über die Einmessung der sichtbaren Tiefe der Beachrockfußlinie die minimale vertikale Erstreckung errechnet werden (vgl.

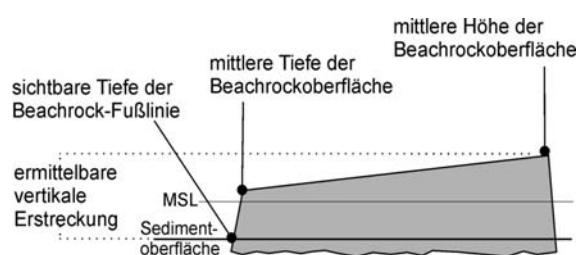


Abbildung 20: Darstellung der Gelände-Messpunkte
Zusammenstellung der topographisch-morphologischen Geländedaten, Tab. 4, Seite ?).

Die Breiten der Beachrockvorkommen schwanken, die plateauartigen Vorkommen ausgenommen, zwischen 1 und 18,5 m, wobei der Großteil Breiten zwischen 3 und 6 m aufweist (vgl. Abb. 21 a; Tabelle 4, S. 65). Die Längen variieren, breitenunabhängig, zwischen 2,5 und 650 m; ca. 2/3 der Vorkommen sind dabei kürzer als 60 m. Die plateauartigen Vorkommen besitzen Flächen zwischen 500 und 1500 m², mit maximaler Breite von 50 m und Länge von 45 m.

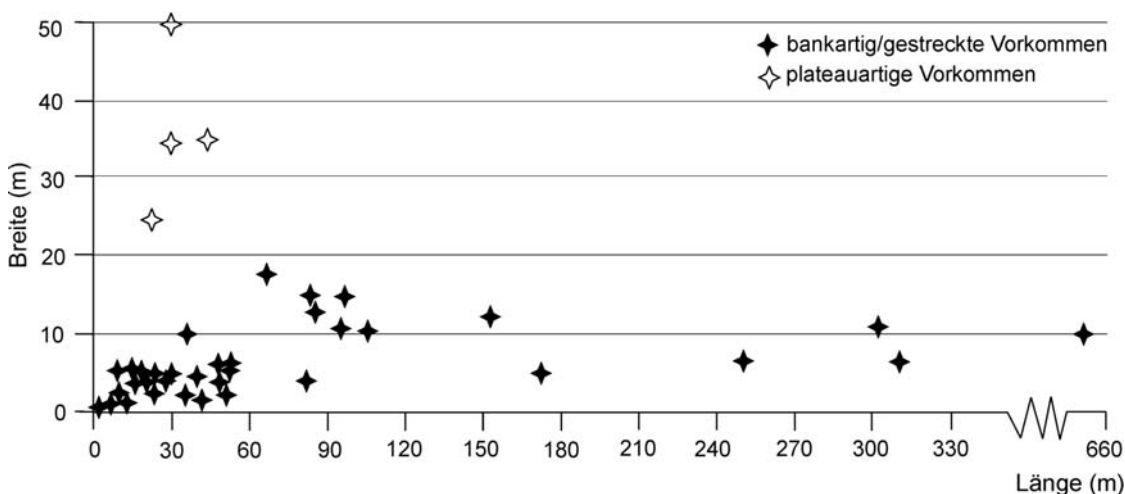


Abbildung 21a: Größenverhältnisse der Beachrockvorkommen

Die vertikalen Erstreckungen der Beachrockvorkommen schwanken zwischen 20 und 160 cm (vgl. Abb. 21 b, S. 63). Hinsichtlich der räumlichen Verteilung zeigen sich keine Besonderheiten. Lediglich ist anzumerken, dass das westliche Testgebiet die zwei mächtigsten Vorkommen besitzt, die mittleren vertikalen Erstreckungen jedoch in etwa denen der anderen Testgebiete entsprechen. Auf den Inseln Rethiraa und Rasfari (Testgebiet West) zeigt sich ein Luv-Lee-Effekt mit größeren vertikalen Erstreckungen der atollrand-exponierten Beachrocks gegenüber den lagunenexponierten Vorkommen (siehe Vorkommen Ret 1 & Ret 2 sowie Ras 1 bzw. 2 & Ras 4; Lageskizzen im Anhang).

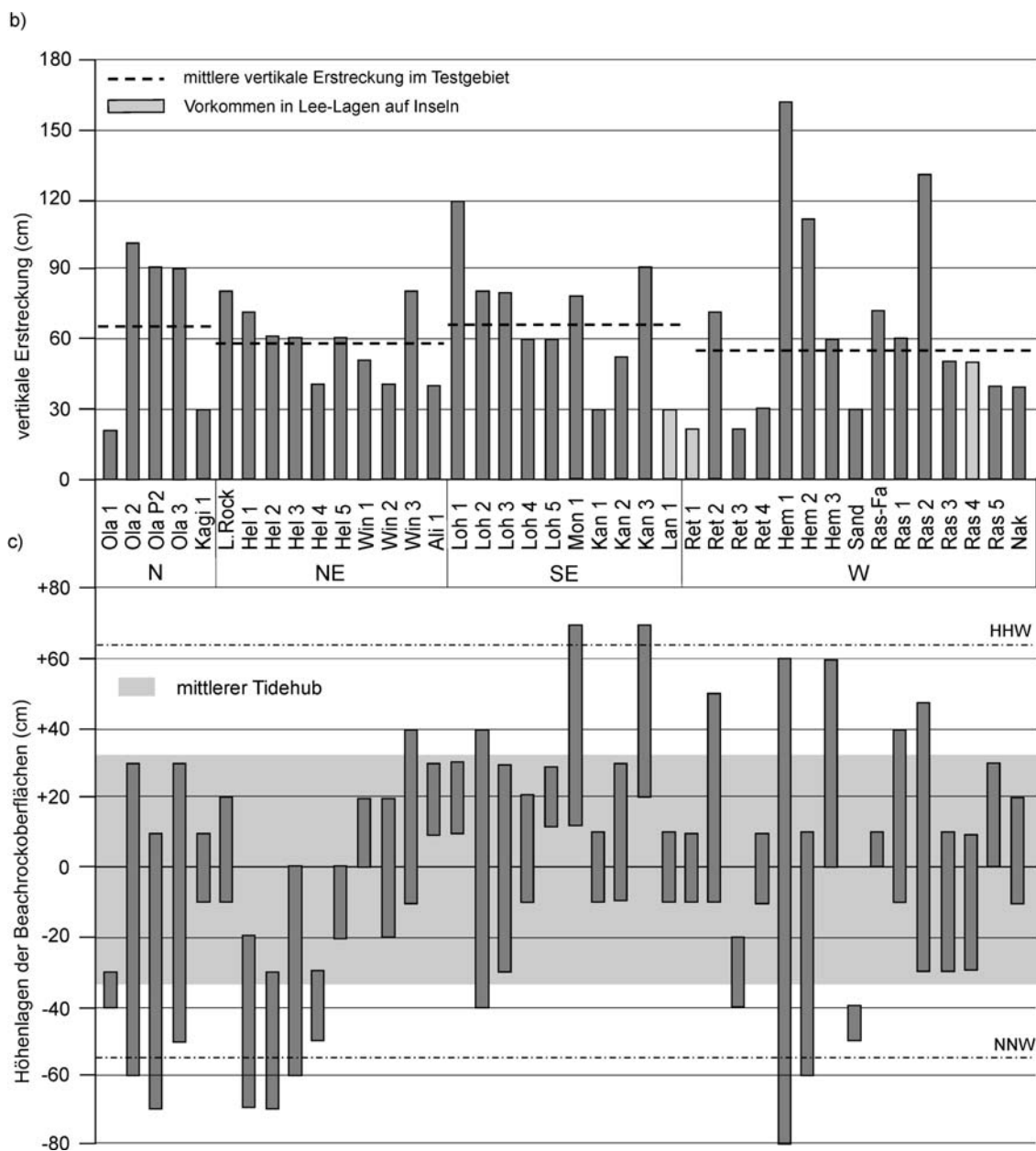


Abbildung 21b&c: vertikale Erstreckungen und Höhenlagen der Beachrockvorkommen

Betrachtet man die Höhenlagen der Beachrockoberflächen (vgl. Abb. 21 c) so zeigt sich, dass alle Vorkommen zumindest teilweise im Bereich des mittleren Tidehubs liegen. Das Vorkommen Sand muss hierbei außer Acht gelassen werden, da der Beachrock vor dem Lockersedimentkörper auf dem Riffdach liegend, deutliche Bruchstrukturen aufweist. Dies deutet darauf hin, dass das Vorkommen durch Brandungseinwirkung verlagert und zerstört wurde. Neun Beachrockvorkommen liegen mit ihrem höchsten Punkt über der mittleren Hochwassermarke, darunter zwei (Mon 1 & Kann 3) sogar über dem höchsten astronomischen Hochwasser (HHW). Ebenso liegen bei zwölf Vorkommen die tiefsten Punkte der Oberfläche unter der mittleren Niedrigwassermarke, darunter wiederum sieben

Vorkommen (z.B. Ola 2 sowie Hel 1, 2 & 3) unter dem niedrigsten astronomischen Niedrigwasser (NNW). Bezieht man hierbei noch die Tiefen der Fußlinien mit ein, liegt die Basis der Beachrocks bis zu 50 cm (Vorkommen Hem 1) unter dem NNW bzw. über 70 cm unter dem mittleren Niedrigwasser. Dies würde jedoch, ausgehend von der Intertidalthese (siehe Kap. 1), eine subtidale/submarine Sedimentverfestigung voraussetzen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass weder hinsichtlich der Breiten oder Längen, noch hinsichtlich der vertikalen Erstreckungen regelhafte Zusammenhänge zwischen den einzelnen Vorkommen vorliegen, allerdings ein leichter Luv-Lee-Effekt auf den Inseln zu beobachten ist. Die Auswertung der Höhenlagen bzw. vertikalen Erstreckungen der Beachrockoberflächen zeigt, dass keine direkte Beziehung zum Tidenhub vorliegt, selbst wenn man lokale Erhöhungen des HHW durch die submarinen Reliefverhältnisse mit einbeziehen würde.

Tabelle 4: Zusammenstellung der topographisch-morphologischen Geländedaten

Insel	Nr.	mittlere Streichrichtung	mittlere Exposition	max. Höhe der Oberfläche	max. Tiefe der Oberfläche	sichtbare Tiefe der Fußlinie	vertikale Erstreckung	mittlere Breite (m)	Länge (m)	Niveaus
Testgebiet N										
Olahali	1	160	070	-30	-40	-50	20	1	14,5	1
Olahali	2	341	251	30	-60	-70	100	8,5	310	4
Olahali	P2	345	255	10	-70	-80	90	9	-	5
Olahali	3	341+ 330	251 + 060	30	-50	-60	90	11	105	8
Kagi	1	306	036	10	-10	-20	30	1	5,5	1
Testgebiet NE										
Lately Rock	1	129	039	20	-10	-60	80	7	48	1
Helengeli	1	208	118	-20	-70	-90	70	4,5	81	3
Helengeli	2	211	121	-30	-70	-90	60	4	18	2
Helengeli	3	"218"	308	0	-60	-60	60	35	30	1
Helengeli	4	055	325	-30	-50	-70	40	4,5	17	1
Helengeli	5	050	320	0	-20	-60	60	4,5	19	1
Winnikawandu	1	195	285/105	20	0	-30	50	5	41	1
Winnikawandu	2	229	319/139	20	-20	-20	40	5,5	15	1
Winnikawandu	3	241	331 + 151	40	-10	-40	80	11	95	3
Alifinolu	1	063	333/153	30	10	-20	50	16	85	2
Testgebiet SE										
Lohifushi	1	301	211	40	-40	-80	120	15	95	2
Lohifushi	2	239	149	20	-40	-60	80	5,5	53	1
Lohifushi	3	"225"	135	30	-30	-50	80	25	20	4
Lohifushi	4	214	124	20	-10	-40	60	4	52	2
Lohifushi	5	176	086	30	10	-30	60	4	28	1
Monifinolu	1	"140"	50	70	10	-10	80	35	45	3
Kanuhura	1	136	046	10	-10	-20	30	4	17	1
Kanuhura	2	173	083	30	-10	-20	50	6	11	3
Kanuhura	3	"158"	68	70	20	-20	90	50	30	3
Lankanfushi	1	198	288	10	-10	-20	30	3	20	2
Testgebiet W										
Rethiraa	1	351	081	10	-10	-10	20	7	52	1
Rethiraa	2	356	266	50	-10	-20	70	10	650	3
Rethiraa	3	356	266/86	-20	-40	-40	20	5	30	1
Rethiraa	4	019	289	10	-10	-20	30	3	49	1
Hembadoo	1	306	216	60	-80	-100	160	18,5	69	4
Hembadoo	2	056	316	10	-60	-100	110	12,5	151	3
Hembadoo	3	056	316	60	0	0	60	2,0	2,5	1
Sand	1	121	211	-40	-50	-70	30	3	10	1
Rasfari-Faro	1	347	257	10	0	-60	70	5,5	170	2
Rasfari	1	019	289	40	-10	-20	60	7	249	4
Rasfari	2	027	297+117	50	-30	-50	100	14,5	80	3
Rasfari	3	278	188	10	-30	-40	50	10	33	3
Rasfari	4	019	109	10	-30	-40	50	11,5	304	4
Rasfari	5	026	296+026	30	0	-10	40	3,5	35	2
Nakatchafushi	1	276	006	20	-10	-20	40	2,5	39	1

Erläuterungen: „168“: Streichrichtung der Strandlinie bei plateauartigen Vorkommen; Exposition senkrecht zu Strandlinie
 296+026: unterschiedliche Expositionen innerhalb eines Vorkommens; 285/105: waagerechte Lagerung

5.2.4 Morphologischer Aufbau

Bei der Aufnahme der Beachrockvorkommen wurden an den repräsentativ gewählten Profilen die morphologischen Strukturen vermessen und kartiert. Durch seitliche Grabungen wurde versucht den Verlauf inner- bzw. unterhalb des Sedimentes, soweit es die örtlichen Gegebenheiten erlaubten, zu ergründen. Auf Grund des höchst differenzierten morphologischen Aufbaus der Beachrockvorkommen ist eine einheitliche Charakterisierung nicht möglich. Vielmehr sollen im Folgenden die generellen Unterschiede typisiert werden. Dabei können die Vorkommen in den verschiedensten Typenvariationen auftreten (vgl. Profilzusammenstellungen S. 73 ff).

(1) Die Basis der Beachrockvorkommen bilden sowohl die Riffdächer als auch die Lockersedimentkörper der Inseln. Allerdings können die Vorkommen auch seewärts auf dem Riffdach und landwärts auf dem Lockersediment aufliegen (vgl. Abb. 22, S. 67). In letzteren Fällen zeigt sich häufig ein „Auslaufen“ des Beachrock in den Sedimentkörper im Sinne einer Verringerung der Festigkeit, so dass häufig bereits nach wenigen Zentimetern unter der Sedimentoberkante keine klare Grenzziehung zwischen dem eigentlichen Beachrock und dem Sediment mehr möglich ist (vgl. Bild 8)



Bild 8: Durchtrenntes Beachrockniveau (in Inselkörper auslaufend, südliches Ende Olahali 2, August 1994); nachlassende Festigkeit ab ca. Sedimentoberfläche in Richtung Lockersedimentkörper; nach etwa 10-15 cm völliger Übergang des Beachrock in Lockersediment.

Der „Riffdach-Typ“ findet sich überwiegend bei den plateauartigen und v. a. bei den frei auf den Rifhdächern liegenden Vorkommen. Der „Lockersediment-Typ“ und der „Misch-

Typ“ sind durchwegs an die Inseln gebunden. Beim Mischtyp muss jedoch in Betracht gezogen werden, dass bei kleineren Vorkommen (z. B. Sand, Helengeli 4) eine Verlagerung des Beachrock vom Lockersedimentkörper (wie bereits beim Vorkommen Sand erwähnt) in Richtung des Riffdaches stattfand.

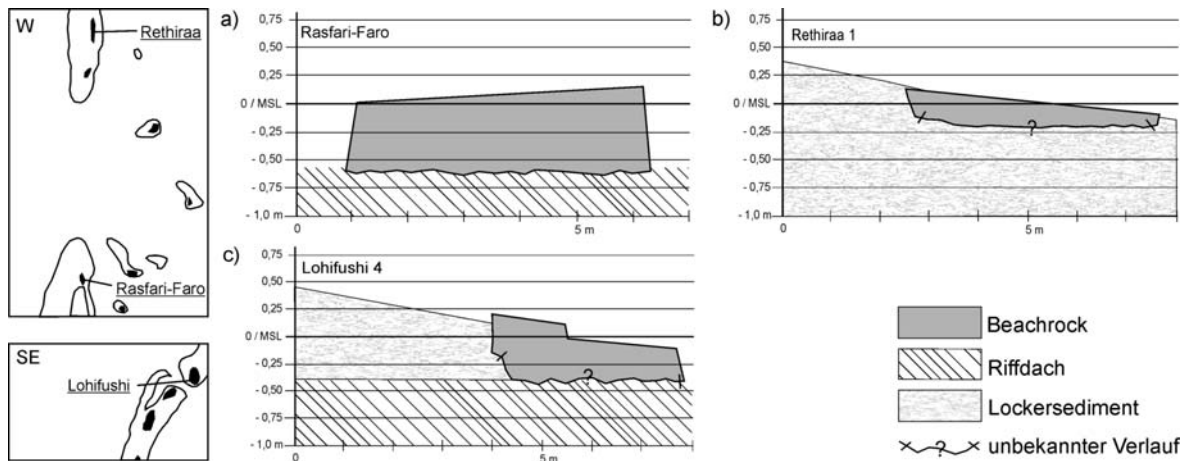


Abbildung 22: Lagetypen der Beachrockvorkommen:

a) „Riffdach-Typ“, b) „Lockersediment-Typ“ & c) „Misch-Typ“

(2) Bei der Form der Beachrockvorkommen kann generell zwischen linienhaften und flächenhaften/plateauförmigen Typen unterschieden werden. Erstere zeigen dabei sowohl gerade, wie mit der Schnur gezogene, als auch leicht gekrümmte Formen auf, (dies überwiegend bei freistehenden Vorkommen) oder folgen dem Verlauf der Strandlinie. Dabei sind die Vorkommen allseitig klar gegen den Strand bzw. das Riffdach abgrenzbar gewesen, in den Inselkern ausgestrichen, oder miteinander verschmolzen (siehe Bild 9 und Abb. 23a, S. 68, Insel Rasfari).



Bild 9: Verschmelzende und in Inselkern auslaufende Beachrocks (Insel Olahali, Vorkommen 3)

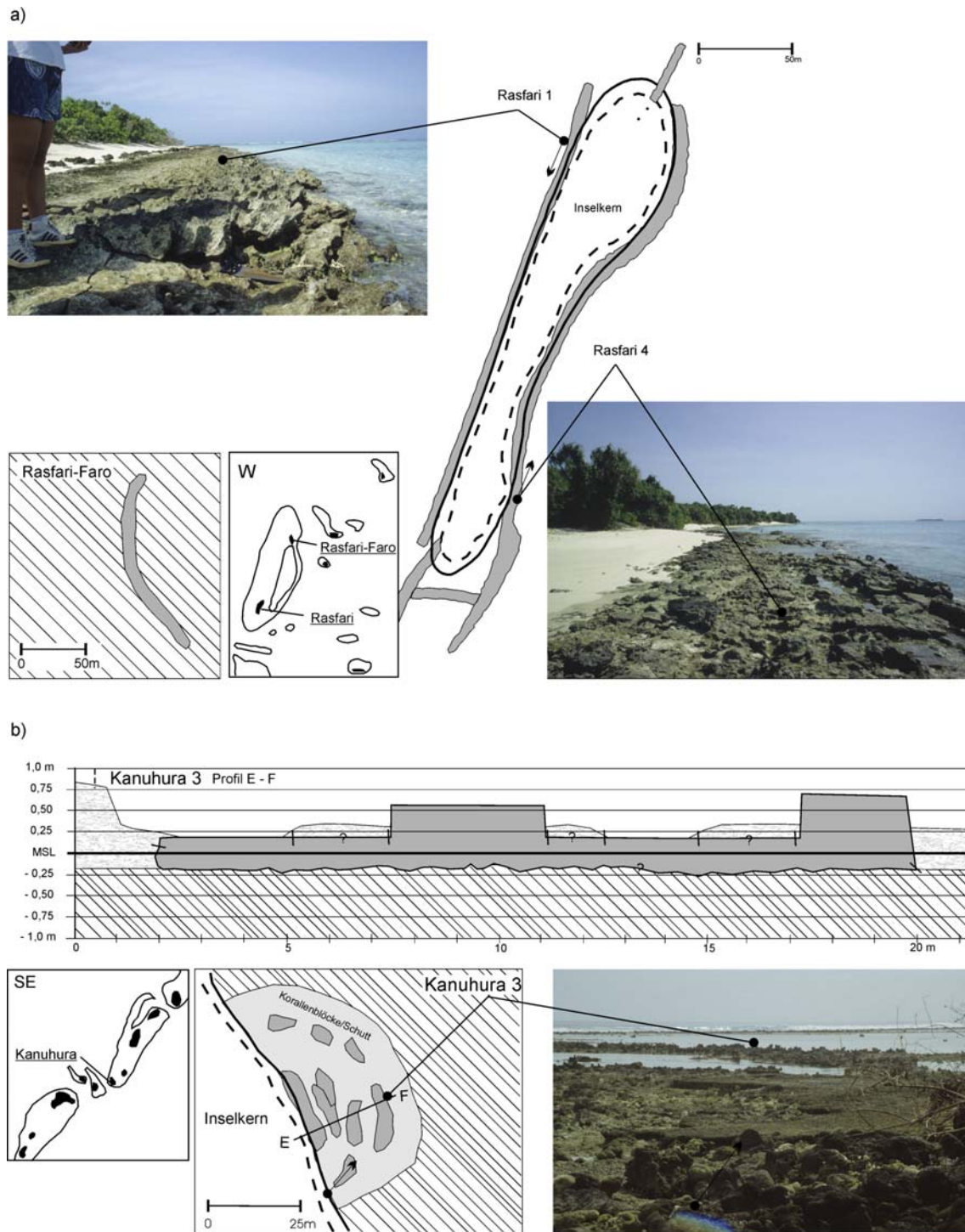


Abbildung 23: Formtypen der Beachrockvorkommen: a) „Linien-Typen“, b) „Plateau-Typ“

Der „Plateau-Typ“ besitzt eine vermutlich durchgängige Beachrockplatte, der wiederum einzelne Beachrocks aufsitzen (vgl. Abb. 23b und Inselkarten/Lageskizzen im Anhang).

(3) Betrachtet man die Beachrockvorkommen hinsichtlich der Oberflächenmorphologie, so zeigt sich wiederum die hohe Variabilität. Die Bandbreite der Oberflächenstrukturen reicht von einfachen, nicht gestuften Platten bis hin zu Vorkommen mit acht Niveaus (vgl. Abb. 24b, Vorkommen Olahali 3). Die mit Sicherheit feststellbare Mächtigkeit der einzelnen Niveaus liegt zwischen 10 und 60 cm.

Die einzelnen Niveaus sind, wie auch der gesamte Beachrock, waagrecht gelagert, oder weisen eine seewärtige Neigung von bis zu ca. 12° auf. Dabei können die Neigungsverhältnisse zwischen den Niveaus eines Vorkommens deutlich verschieden sein. Nur ein einziges Niveau (Vorkommen Kanuhura 3) besitzt eine landwärtige Neigung. Die Oberflächen weisen nur zum Teil die gleichen bzw. ähnlichen Neigungen wie die Strände auf. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass es sich um eine Momentaufnahme handelt, und sich die morphologischen Verhältnisse der Strände (wie in Karte 1, Kapitel 2, gezeigt) im Jahresverlauf ändern können.

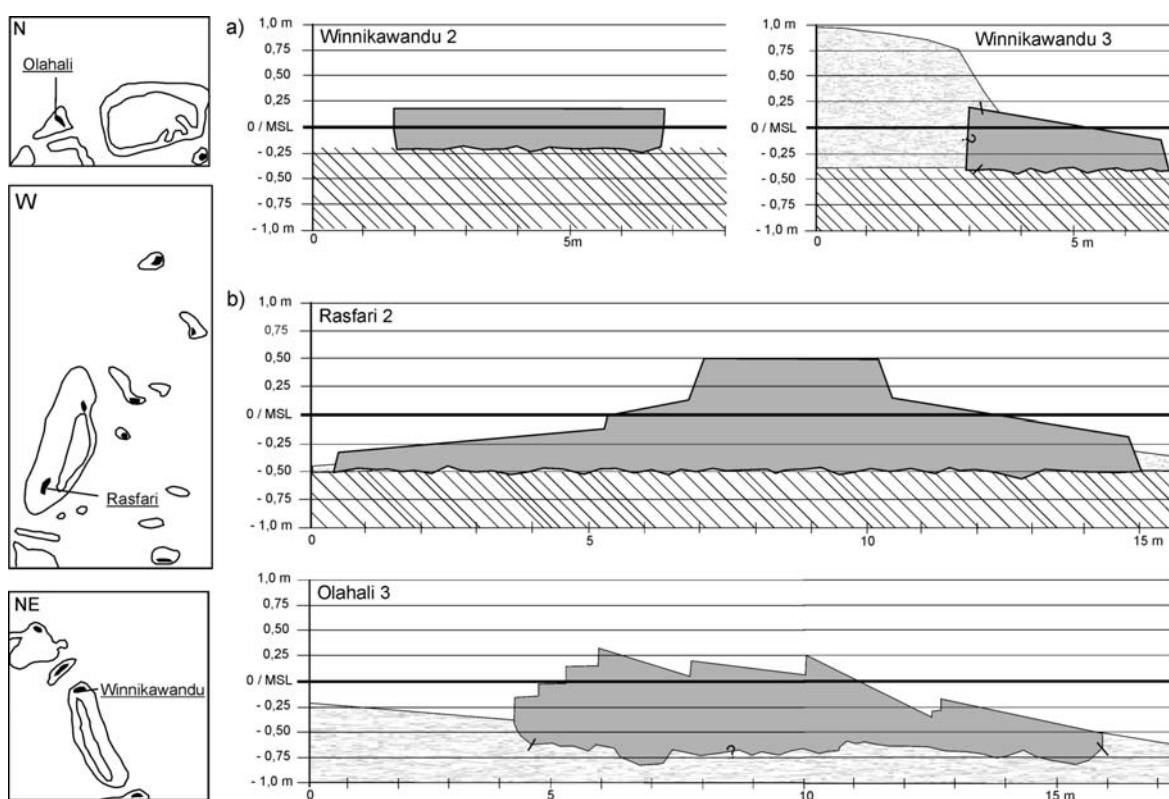


Abbildung 24: Oberflächentypen der Beachrockvorkommen:
a) „Einfach-Niveau-Typ“ und b) „Mehrfach-Niveau-Typ“

Die Oberflächengestalt eines Beachrocks zeigte sich innerhalb eines Vorkommens relativ gleich bleibend sein, aber zum Teil auch mit deutlichen Veränderungen. Am auffälligsten war diese Veränderung beim Vorkommen 2 auf der Insel Olahali (vgl. Abb. 25, S. 70).

Bei den zwei Profilen in Abbildung 25 zeigen sich nicht nur Unterschiede in der Anzahl und den Neigungsverhältnissen der Niveaus, sondern auch in der Breite und in der maximalen Höhe des Vorkommens.

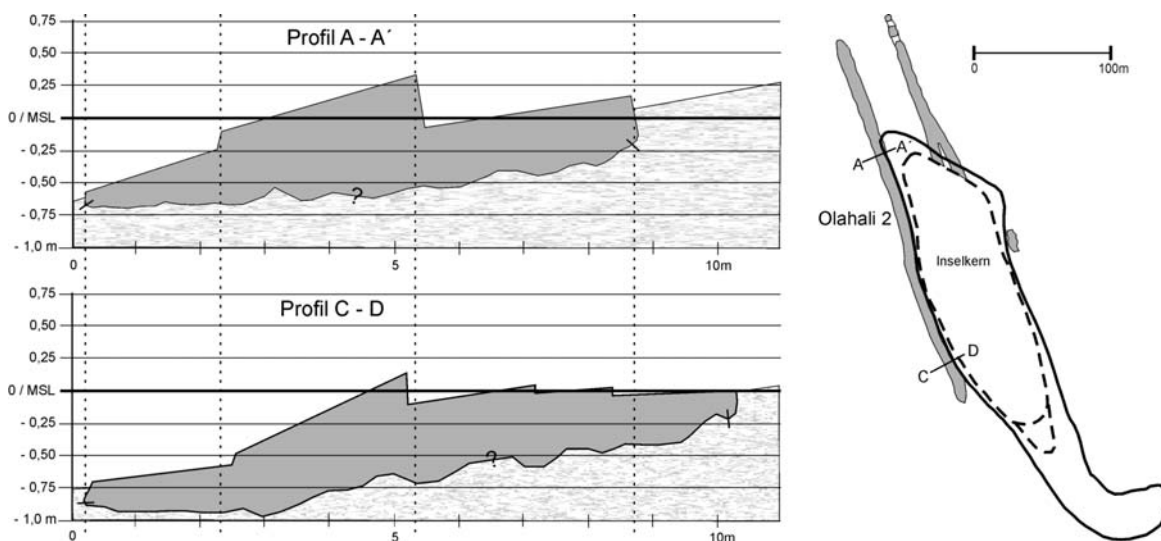


Abbildung 25: Veränderung der Oberflächenmorphologie innerhalb des Beachrockvorkommens Olahali 2, Testgebiet Nord

Setzt man die markanten Niveaustufen einander gegenüber, so hat es den Anschein, dass das ursprünglich über die ganze Erstreckung laufende Vorkommen 2 im südlichen Bereich eine abrasive Umformung mit anschließender Sedimentakkumulation und Verfestigung erfahren hat. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass beide Vorkommen zeitlich versetzt gebildet wurden und miteinander verschmolzen, dabei jedoch die jeweiligen Genesebedingungen ähnlich waren. Erstere Erklärung könnte auch für den sehr ähnlichen Aufbau der unter dem MSL gelegenen Niveaus, im Gegensatz zu den darüber liegenden, der Vorkommen 1 und 2 der Insel Hembadoo herangezogen werden (vgl. Profilzusammenstellung 7, S. 79).

Richtet man sein Augenmerk anschließend auf die Oberflächenstrukturen der Vorkommen in den Testgebieten (vgl. Abb. 26, S. 71), so zeigt sich, dass

- keine wesentlichen Unterschiede, was die generellen Formen anbelangt, zwischen den Testgebieten vorliegen
- die Vorkommen im Testgebiet NE maximal zwei Niveaus, in den Testgebieten SE und W bis zu vier und im Testgebiet N bis zu acht Niveaus besitzen
- keine Beziehung zwischen der Niveaunzahl und der Höhenlage bzw. der vertikalen Erstreckungen der Vorkommen besteht.

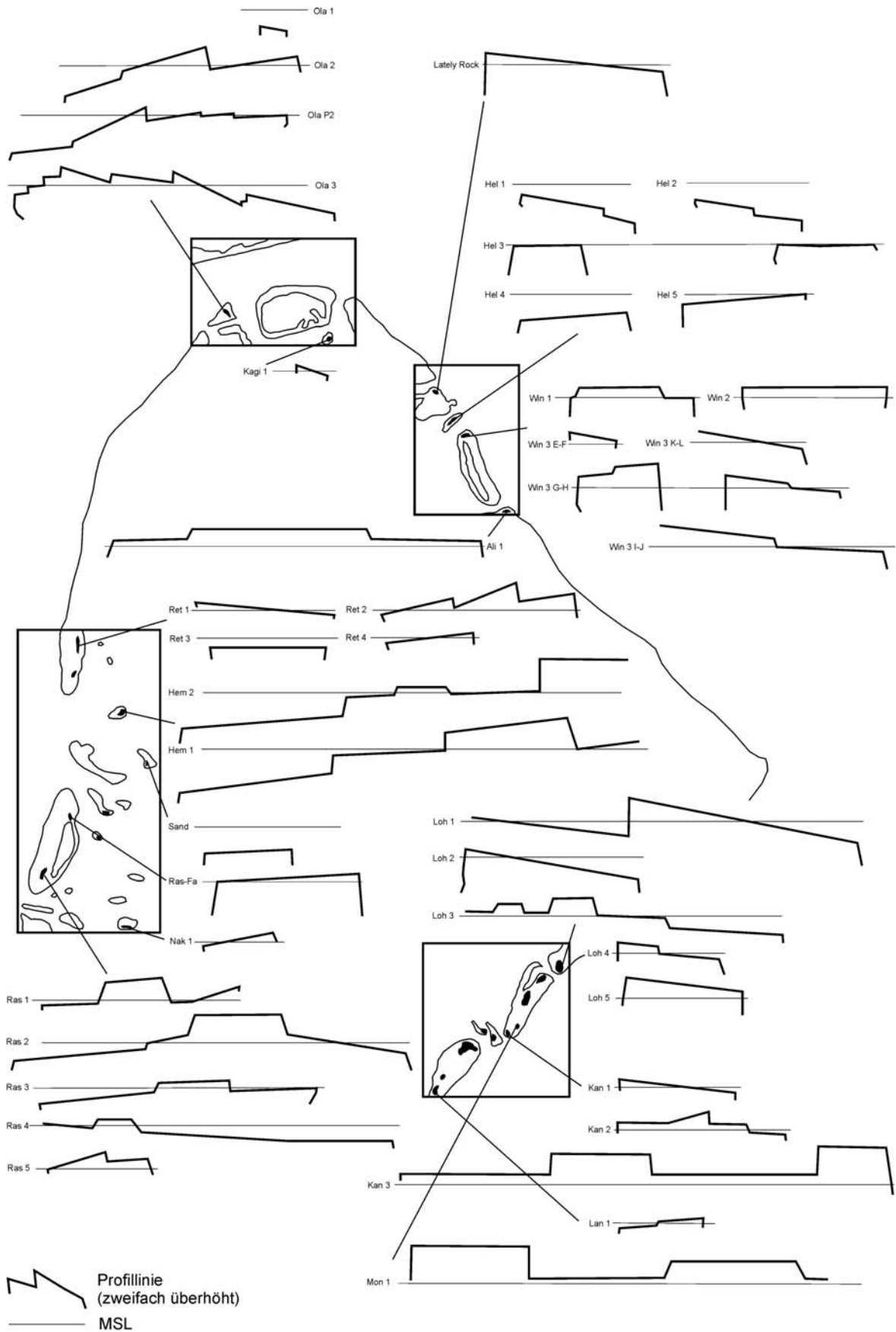


Abbildung 26: Oberflächenformen der Beachrockvorkommen in den Testgebieten

Setzt man die Niveaustufen der Vorkommen in Bezug zum mittleren Meeresspiegel (vgl. Abb. 27), wird deutlich, dass auch hier, selbst unter Berücksichtigung des Höhenmessfehlers, kein direkter Bezug zwischen Niveaustufe und Meeresspiegel vorliegt. Vielmehr ist zu beobachten, dass die Beachrockvorkommen oftmals Lee-seitig die markanten Stufensprünge besitzen und nicht wie eventuell zu erwarten auf den Luv-Seiten.

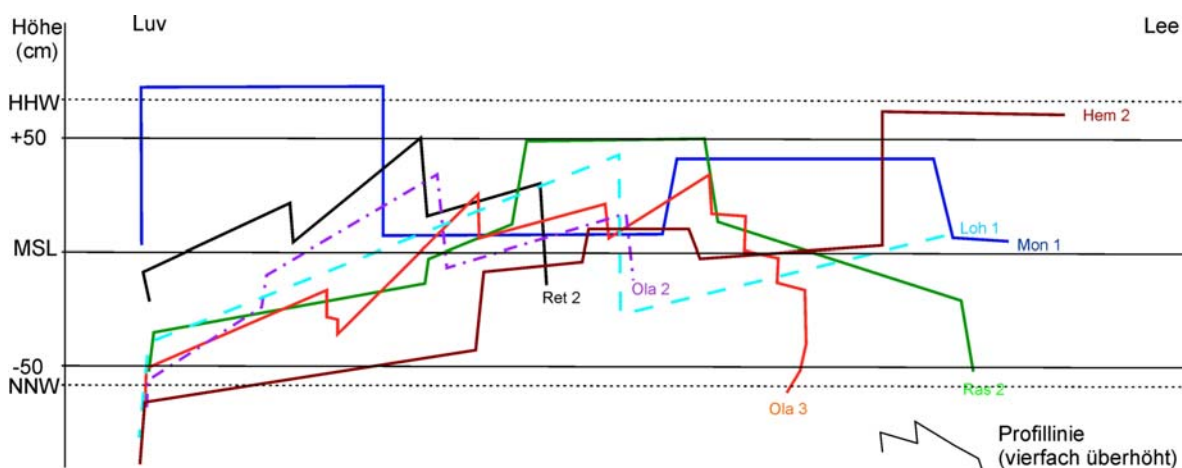
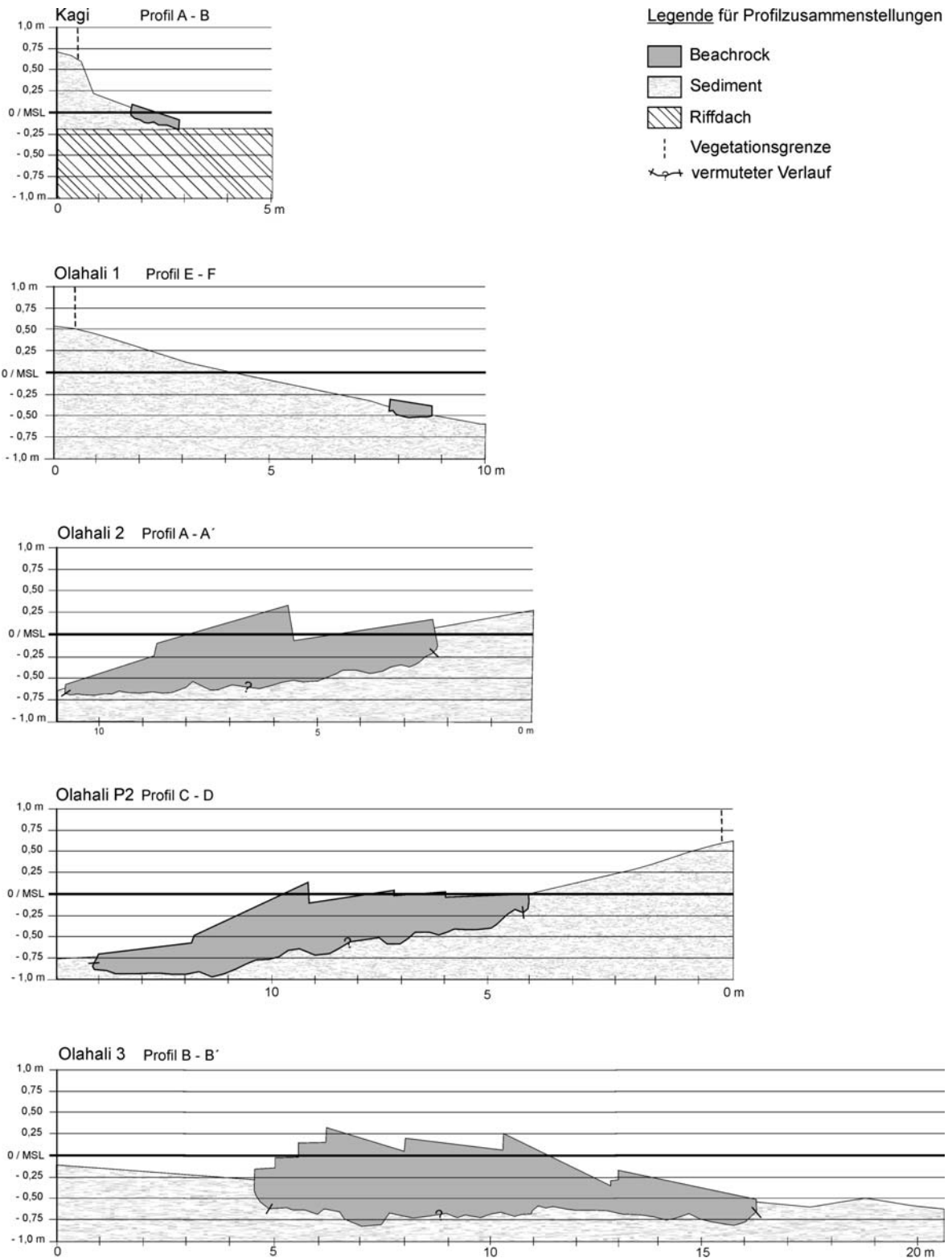


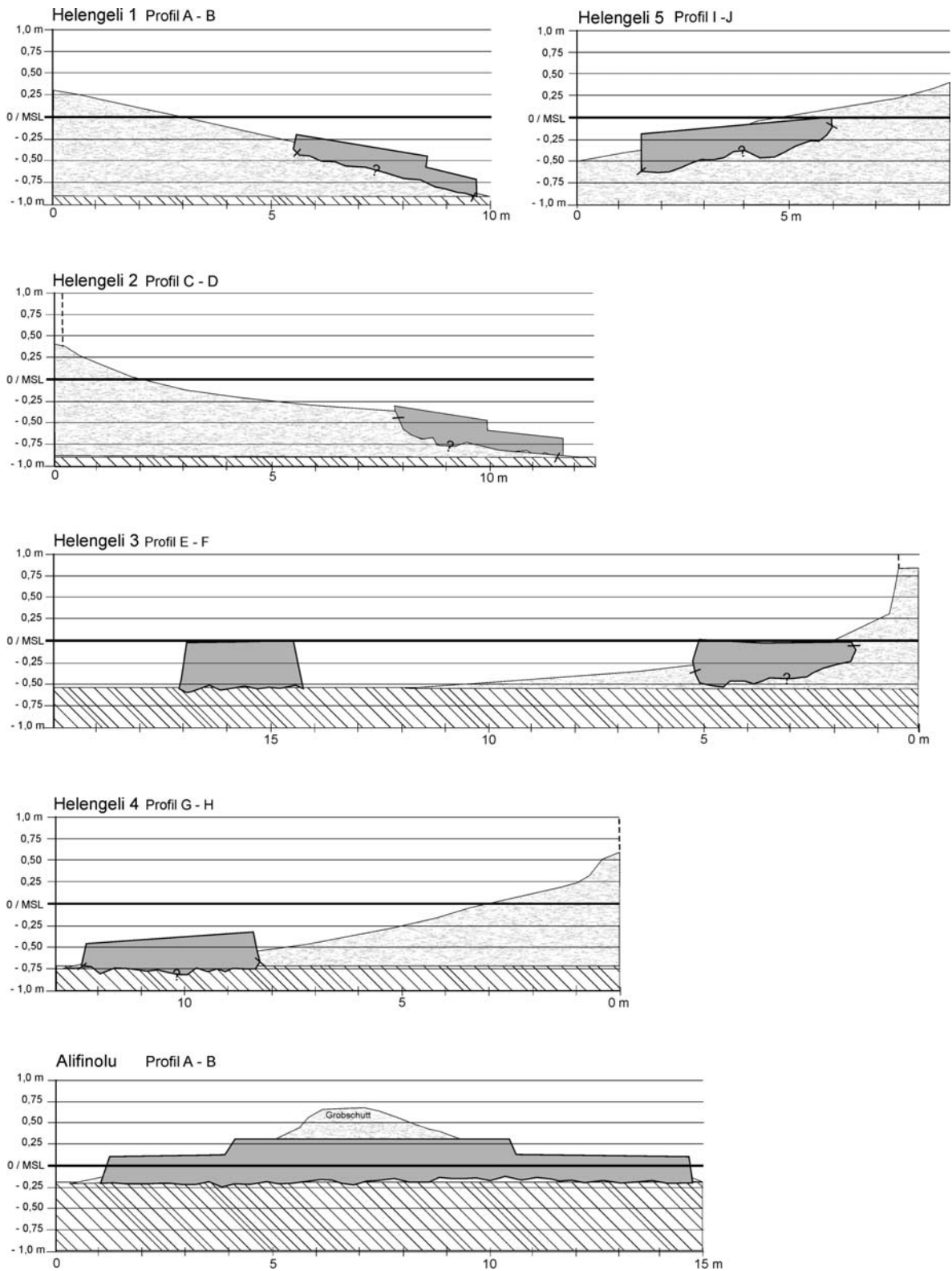
Abbildung 27: Oberflächenformen ausgewählter Beachrockvorkommen im Bezug zum MSL

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Beachrockvorkommen nicht nur hinsichtlich ihrer Lage und Form, sondern vor allem auch hinsichtlich ihrer Oberflächengestalt höchst variabel sind und somit eine einheitliche Charakterisierung nicht möglich ist. Gerade diese Variabilität und die erwähnten Anzeichen für Überformungs- und Verschmelzungsvorgänge zeigen, dass auch die, bei der Bildung und/oder Überformung beteiligten Prozesse eher komplexer Natur sein müssen. Eine „einfache“ Sedimentverhärtung durch Kalkausfällung im Intertidal der Strände und eine spätere Freilegung kann somit keine ausreichende Erklärung liefern.

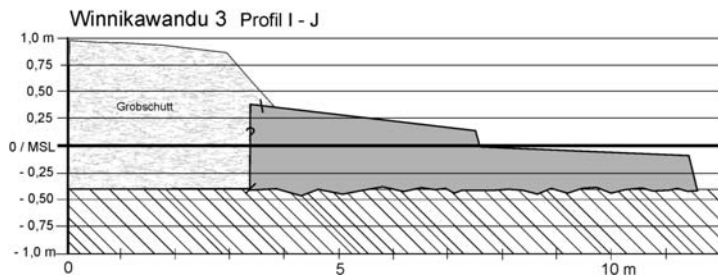
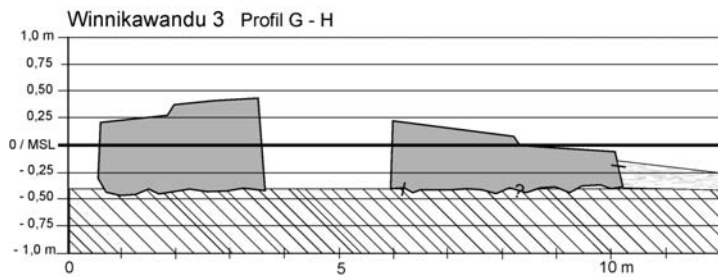
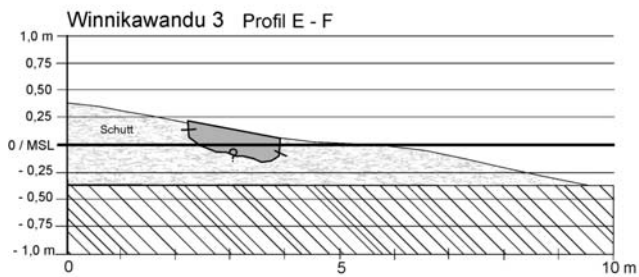
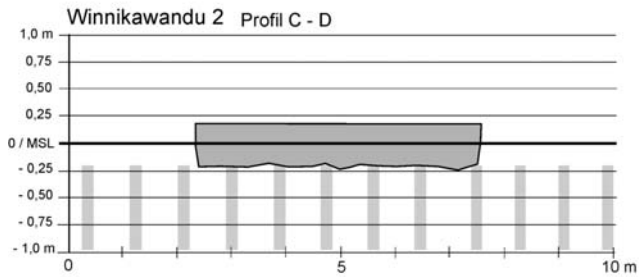
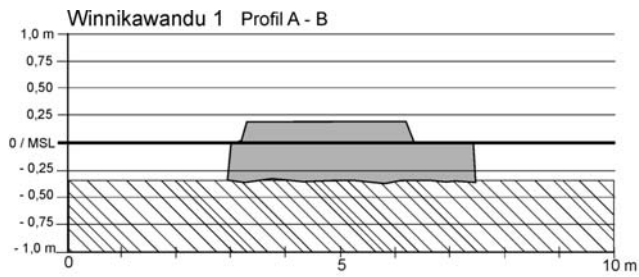
Des Weiteren zeigt sich, dass die unterschiedlichen Niveauoberflächen bzw. -stufen keinen einheitlichen Höhen, und somit nicht direkt einem Meeresspiegelniveau zugeordnet werden können. Folglich sind Meeresspiegelkurven die durch die Zuordnung eines mittleren Meeresspiegels zu den jeweiligen Niveaustufen der Vorkommen erstellt werden mit Vorsicht zu betrachten.



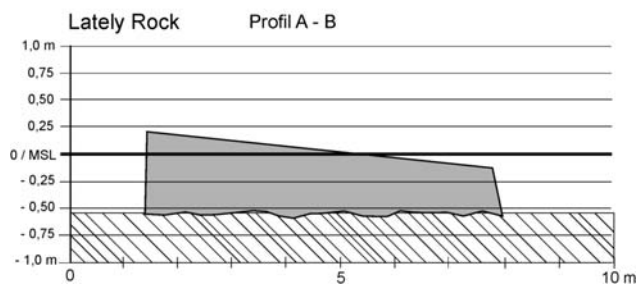
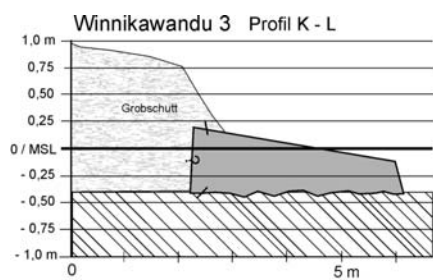
Profilizusammenstellung 1: Beachrockvorkommen Testgebiet Nord; Inseln Olahali und Kagi



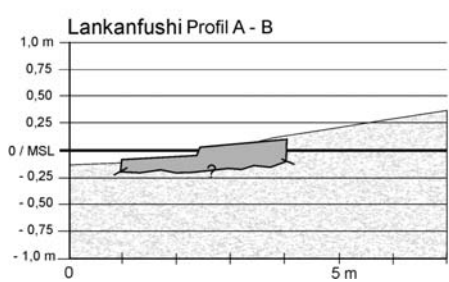
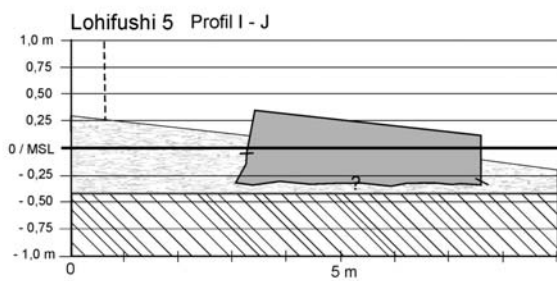
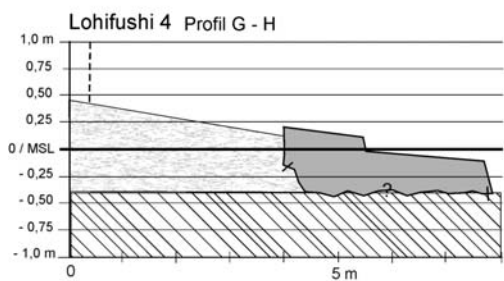
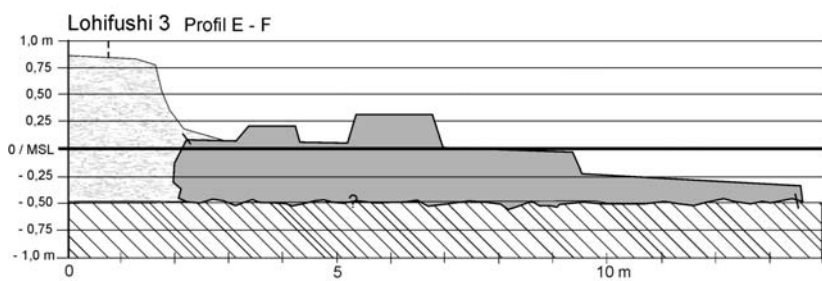
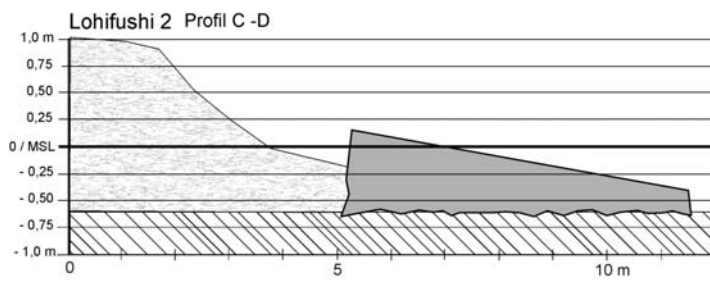
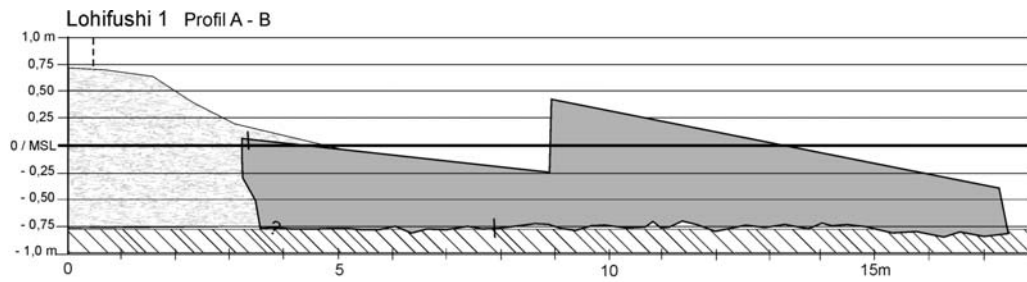
Profilzusammenstellung 2: Beachrockvorkommen Testgebiet Nordost – Teil 1; Insel Helengeli und Fundort Alifinololu



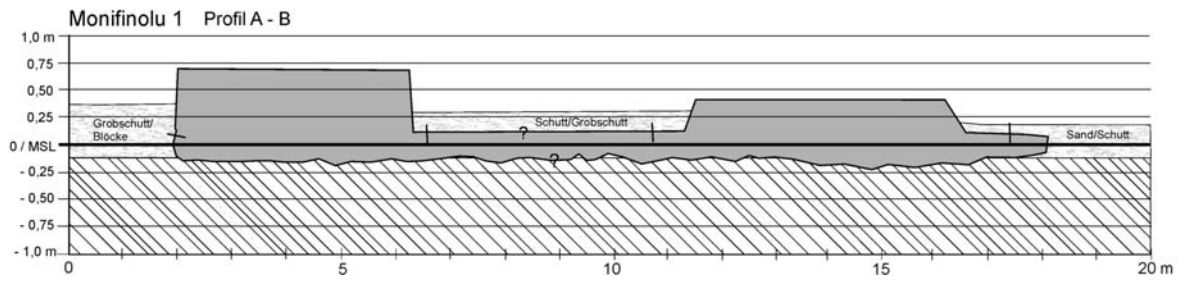
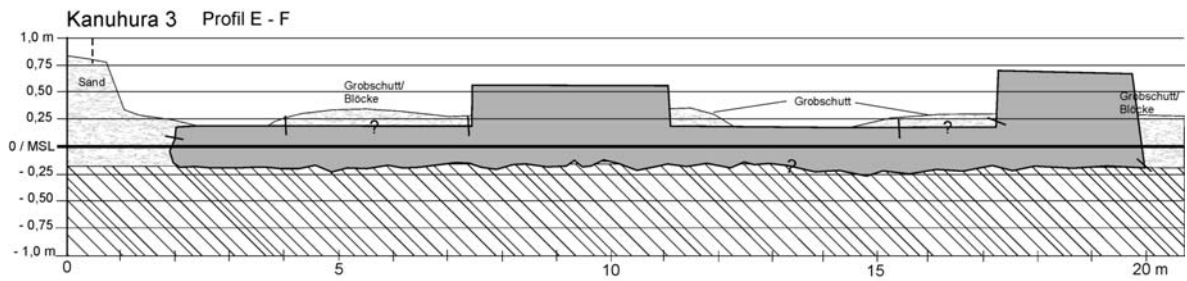
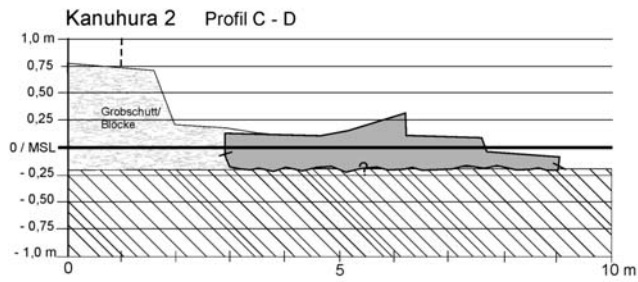
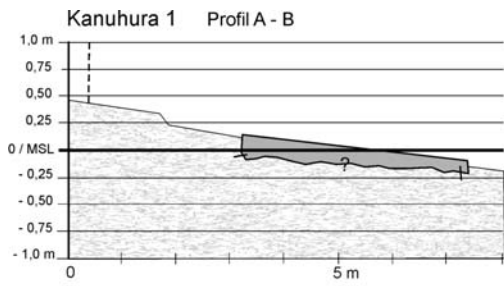
Profilzusammenstellung 3: Beachrockvorkommen Testgebiet Nordost – Teil 2; Fundort Winnikawandu



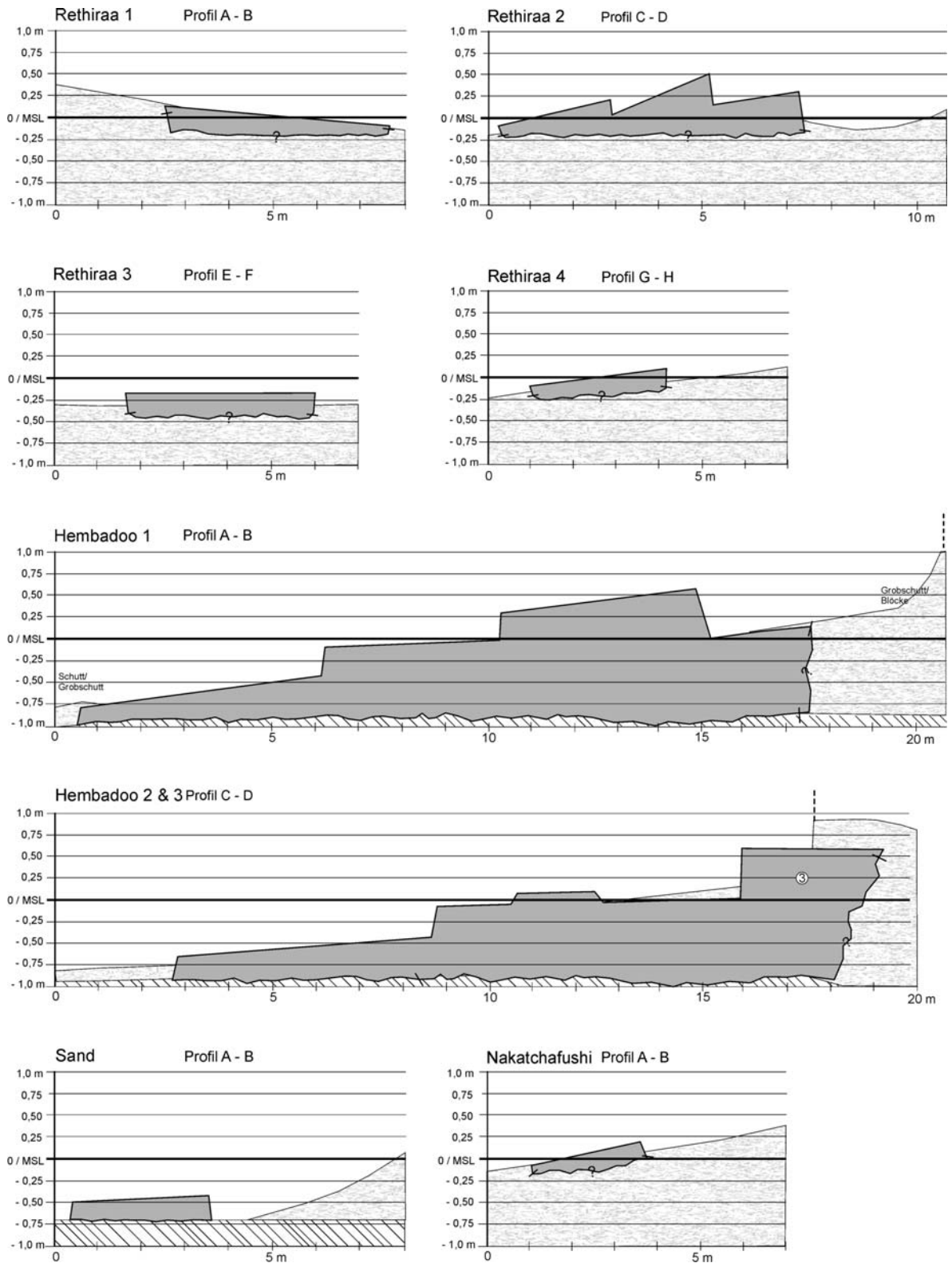
Profilzusammenstellung 4: Beachrockvorkommen Testgebiet Nordost – Teil 3; Fundorte Winnikawandu und Lately Rock



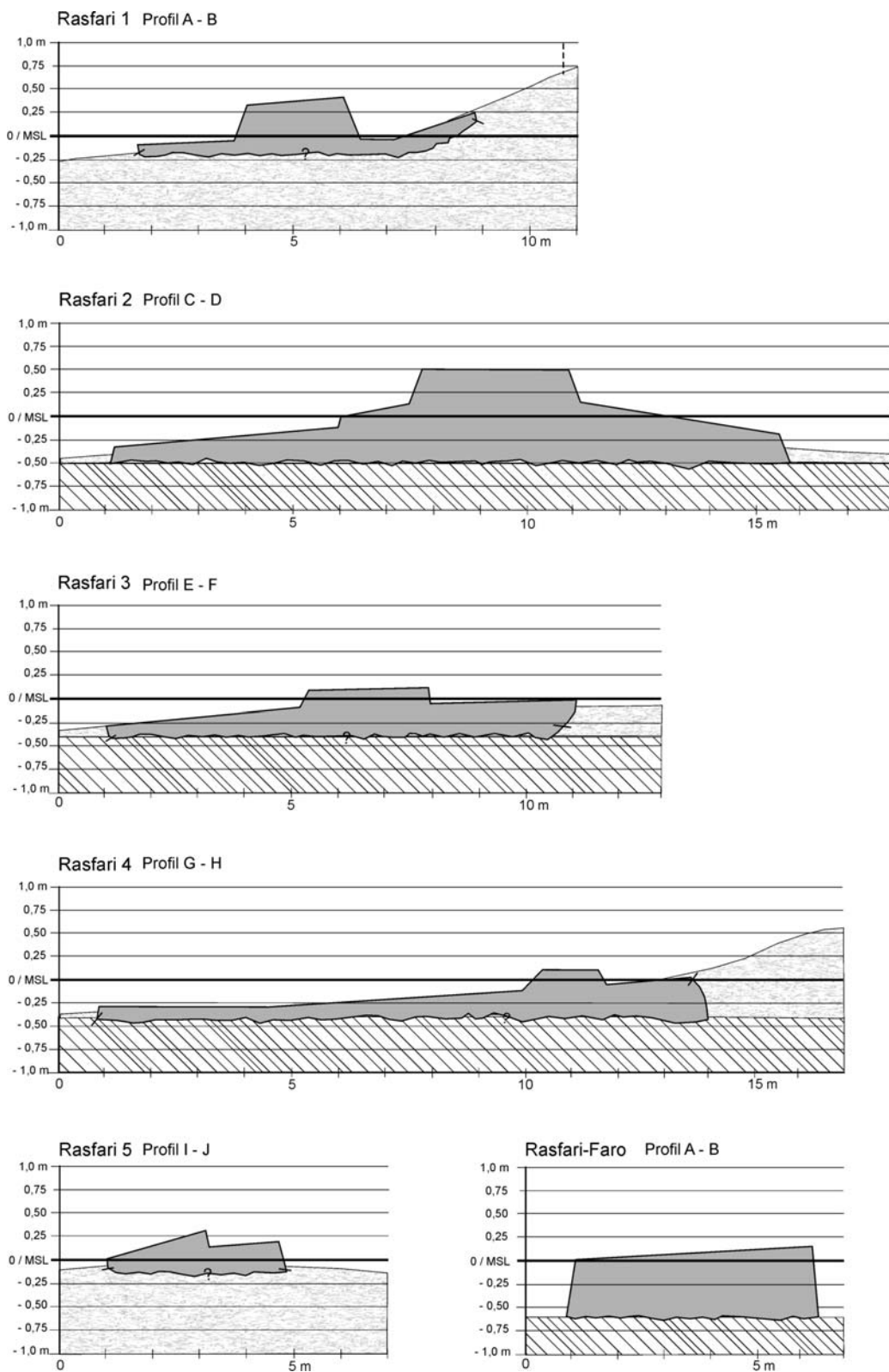
Profilzusammenstellung 5: Beachrockvorkommen Testgebiet Südost – Teil 1; Inseln Lohifushi und Lankanfushi



Profilusammenstellung 6: Beachrockvorkommen Testgebiet Südost – Teil 2; Inseln Kanuhura und Monifinolu



Profilzusammenstellung 7: Beachrockvorkommen Testgebiet West – Teil 1; Inseln Rethiraa, Hembadoo und Nakatchafushi, Fundort Sand



Profilzusammenstellung 8: Beachrockvorkommen Testgebiet West – Teil 2; Insel Rasfari und Fundort Rasfari-Faro

6 Synthese der Ergebnisse

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Beachrockanalysen im globalen Vergleich

Alter der Beachrockvorkommen

Dem Autor selbst liegen keine Altersdatierungen der maledivischen Beachrockproben vor. Jedoch geben KENCH et al. (2005) für zwei Datierungen auf der Insel Thiladhoo (Süd Maalhosmadulu Atoll, ca. 100km nordwestlich des Nord Malé Atoll) Beachrockalter von 1064 ± 45 bzw. 1569 ± 44 Jahren. B.P. an. Damit liegen die maledivischen Beachrocks im allgemeinen Zeitrahmen der Beachrockdatierungen mit Angaben von 239 bis 6265 Jahren B.P. (vgl. Tab. 1, S. 9ff). Allerdings müssen, wie bereits erwähnt, die durch verschiedene Datierungsverfahren ermittelten Alter mit Vorsicht betrachtet werden, da z. B selbst die Korrekturfaktoren für den Reservoir-effekt der Ozeane von Autor zu Autor verschieden sein können. So verwendet WOODROFFE (1992) bei seinen Radiocarbonatierungen einen Korrekturfaktor von $\text{minus } 450 \pm 35$ Jahren, KENCH et al. (2005) arbeiten mit 132 ± 25 Jahren.

Dennoch weisen die Altersangaben und auch die Tatsache, dass sich keine Hinweise in der Literatur für moderne Neubildungen finden darauf hin, dass die Beachrockbildung keinen rezent ablaufenden Prozess darstellt.

Ausgangsmaterial

Neben den Vorkommen die, wie im Falle der Malediven, vollständig aus marinen Karbonaten zusammengesetzt sind, finden sich als Ausgangsmaterial sowohl silikatische als auch vulkanische, sowie gemischte Sedimente. Biogene marine Sedimentanteile sind dabei in verschiedenen Größenordnungen dem Ausgangssubstrat beigemischt. Somit hat das Ausgangsmaterial keinen direkten Einfluss auf die Beachrockbildung. Die Tatsache, dass die chemischen und organogenen Zusammensetzungen der Sedimente häufig denen der entsprechenden Beachrocks sehr ähnlich sind (vgl. auch EL-SAYED 1988), weist darauf hin, dass die allgemeinen Milieubedingungen (im engeren Sinne die klimatischen und marinen Verhältnisse, die sich direkt auf die Artenzusammensetzung und somit indirekt wiederum auf die Sedimentzusammensetzung auswirken), zum Zeitpunkt der Sedimentakkumulation zumindest annähernd den heutigen entsprechen haben.

Korngrößen

Das Korngrößenspektrum der Beachrockvorkommen auf den Malediven liegt zwischen ca. 1 mm und 30 cm, wobei der Anteil der Fraktionen zwischen 2 und 10 mm überwiegt. Finden sich in der Literatur konkrete Angaben zu den Korngrößen von Beachrock, liegen diese im Bereich zwischen 0,2 und 40 cm. Im Allgemeinen werden die Korngrößen überwiegend mit feinsandig bis kiesig angegeben. (Beschreibungen von Beachrockvorkommen mit tonigen bzw. feinschluffigen Körnungen sind in der Literatur nicht zu finden). Im Falle der Malediven zeigt sich auch, dass die Korngrößenzusammensetzung der einzelnen Niveaus innerhalb eines Vorkommens unterschiedlich sein kann. Dies belegt, dass die Korngrößenzusammensetzung keinen direkten Einfluss auf die Beachrockbildung hat und nur in soweit eine Rolle spielt, als dass eine gewisse Permeabilität des Sedimentes zu dessen Zementierung gewährleistet sein muss.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass im Gegensatz zu den Angaben in Literatur die sedimentäre Zusammensetzung des rezenten Strandmaterials im Untersuchungsgebiet in vielen Fällen nicht der des entsprechenden Beachrocks entspricht. Dies zeigt, dass die Ablagerungsenergie und/oder das Liefergebiet der Sedimentakkumulation nicht allein den zyklischen, monsunalen Verhältnissen zu zuordnen ist. Weiterhin belegen die unterschiedlichen Korngrößenzusammensetzungen der einzelnen Niveaus innerhalb der Beachrockvorkommen (siehe. Rasfari 2 oder Winnikawandu 3-2), dass die Sedimentablagerung nicht als Einzelereignis sondern vielmehr als eine Abfolge von Akkumulationsvorgängen zu sehen ist.

Matrix

Wie auch auf den Malediven zeigen die Beachrockvorkommen anderer Lokalitäten oftmals gemischte Strukturen, was die Zementzusammensetzung anbelangt, auf. So kann die Matrix nur eine kristalline Form des Kalziumkarbonates enthalten, oder aus einer Kombination mehrerer Modifikationen (Aragonit, Hoch-Magnesium-Calcit, Calcit, oder - wie im Falle der Malediven - sogar Vaterit) zusammengesetzt sein. Dabei können sich die jeweiligen Anteile innerhalb eines Vorkommens verschieben, wie bei dem von MOORE (1977) untersuchten Vorkommen auf der Insel St. Croix (Jungferninseln), bei dem eine Abnahme des Aragonitanteils von Ost nach West beobachtet wurde. Oder wie bei BEIER (1985) die Matrix des jüngeren Beachrock auf der Insel San Salvador (Bahamas) überwiegend aus Aragonit, die des Älteren aus Calcit aufgebaut sein. Letzteres muss nicht, wie von BEIER postuliert, auf unterschiedliche Genesebedingungen zurückzuführen sein, sondern spiegelt wohl eher die Transformation von Aragonit zu Calcit wieder.

Versucht man eine globale Zuordnung der unterschiedlichen Zemente in Bezug auf die klimatischen Rahmenbedingungen (vgl. Abb. 28), so zeigt sich einerseits das überwiegende Auftreten des Beachrocks in der subtropischen und v. a. tropischen Klimazone, dabei sowohl in humiden als auch ariden Bereichen. Andererseits ist zu beobachten, dass reine, nicht aragonitische, Zementformen sowie Mischungen ohne Aragonitanteil nur jeweils einmal auftreten. Die Zemente mit Aragonit bilden, unabhängig von den klimatischen Verhältnissen, mit knapp 85 % den Großteil.

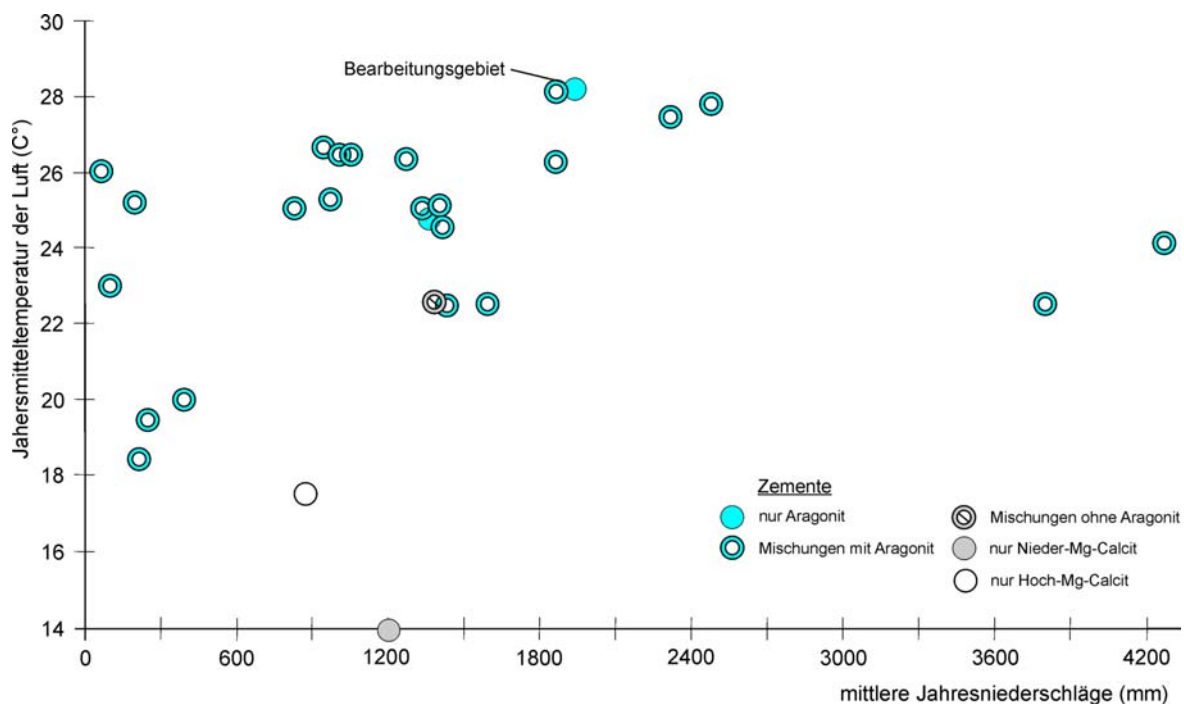


Abbildung 28: Klimatische Zuordnung der Beachrockzemente. Angaben aus den jeweiligen Arbeiten (vgl. Tab. 1); ergänzt durch Klimadatenbanken des Deutschen Wetterdienstes und der World Meteorological Organisation.

Dies deutet an, dass Aragonit den primären Zement darstellt und die Calcitanteile eher der Transformation des Aragonit, denn der direkten Ausfällung zugesprochen werden können. Schlussfolgernd zeigt sich damit der direkte und, höchstwahrscheinlich, ausschließliche Einfluss des Meerwassers auf die Sedimentzementierung.

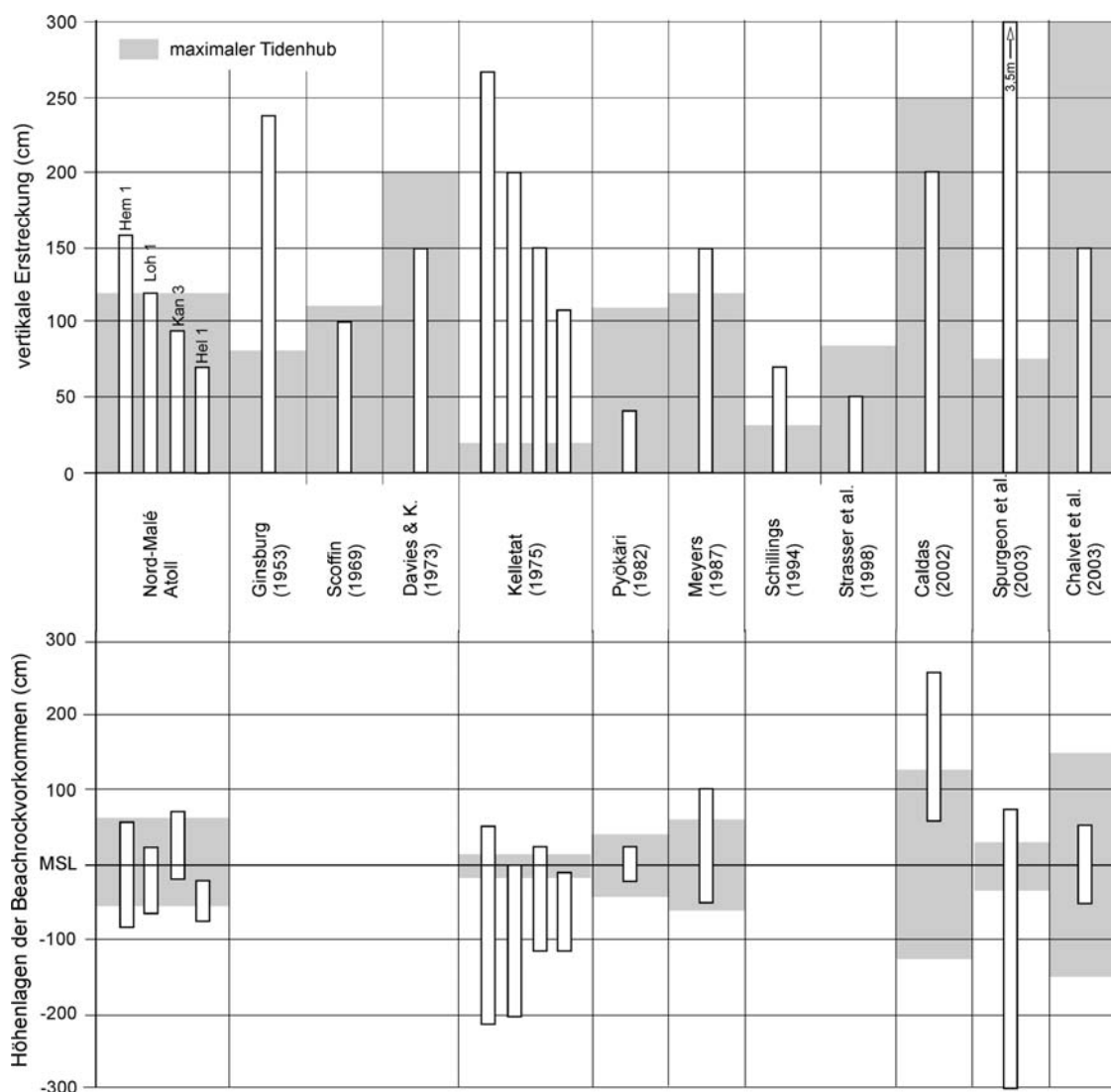


Abbildung 30: Vertikale Erstreckungen und Höhenlagen der Beachrockvorkommen im Bezug zum Tidenhub und mittleren Meeresspiegel

Dabei können die vertikalen Erstreckungen geringer oder größer als der maximale Tidenhub sein (siehe v. a. KELLETAT 1975 und SPURGEON 2003). Noch klarer wird die Diskrepanz zwischen vertikaler Erstreckung und dem Tidenhub, wenn man sich die Höhenlagen in Bezug zum MSL und Tidenhub betrachtet. Die Beachrockvorkommen können in ihrer gesamten Erstreckung im Tide-Bereich auftreten, oder mit ihren vertikalen Begrenzungen über der Hochwasserlinie und/oder unter der Niedrigwasserlinie liegen.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass weder der Tidehub noch der heutige MSL in einer direkten Beziehung zur vertikalen Erstreckung und altimetrischen Position der Beachrockvorkommen stehen. Verstärkt wird diese Aussage durch die Tatsache, dass der holozäne Meeresspiegel im Zeitbereich der Beachrockgenese je nach Autor höher bzw. tiefer lag als der heutige MSL (vgl. Abb. 32, S. 90).

Topographische Lage und Exposition

Das bevorzugte Auftreten der Beachrockvorkommen im Bearbeitungsraum auf den zum freien Ozean hin exponierten Riffstrukturen findet auch in der Literatur seine Bestätigung. So treten die verschiedenen Vorkommen häufig an „high energy beaches“ wie an der Westküste der Insel Bimini, Bahamas (SCOFFIN 1969), an der Nordküste von Maui, Hawaii (MEYERS 1987) oder in der Currobedo Bucht in NW-Spanien (REY ET AL. 2004) bzw. in Bereichen „...exposed to high energy storm waves“ (PYÖKÄRI 1982, S. 383) auf. Allerdings finden sich heutzutage auch, wie die Beachrockvorkommen des Nord-Male´ Atoll in Lagunenlage/-exposition, Fundorte in geschützten, lagunären Lagen wie in der Lagune von Bahiret el Biban im Südosten Tunesiens (STRASSER ET AL. 1989) bzw. „...im gering-exponierten Küstenmilieu des östlichen Mittelmeerraumes“ (KELLETTAT 1975, S. 53), dabei mit vergleichsweise großen vertikalen Erstreckungen.

Oben Genanntes verstärkt die Hinweise, dass die topographischen Gegebenheiten und Expositionen der Strände bzw. Riffstrukturen, was die Auftrittshäufigkeit der Beachrockvorkommen anbelangt von Bedeutung sind, jedoch die Ablagerung der „Beachrocksedimente“ eher von einzelnen, hochenergetischen Wellenereignissen bzw. der Abfolge solcher beeinflusst wird, welche in Stärke und/oder Richtung außerhalb der lokalen Wellenregime stehen.

Morphologischer Aufbau

Übereinstimmend mit den Vorkommen auf den Malediven zeigen auch die Vorkommen anderer Arbeiten – wenn auch häufig nur Bildmaterial als Vergleichsquelle vorliegt – den höchst variablen morphologischen Aufbau. Angefangen von den einfachen, „intertidalen“ Platten reicht das Spektrum, bis hin zu mehrfach gestuften, komplexen Vorkommen. Liegen zumindest Profilskizzen vor (vgl. Abb. 31), so zeigen sich häufig sehr gute Übereinstimmungen hinsichtlich der morphologischen Grundstrukturen.

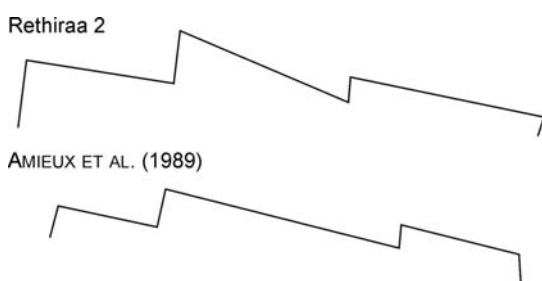


Abbildung 31: Profillinien der Beachrockvorkommen Rethiraa 2 (gespiegelt) und nach AMIEUX ET AL. (1989), doppelt überhöht im relativen Vergleich; (konkrete Maßstabsangabe bzw. Zuordnung zum MSL lag nicht vor)

Wie auf den Malediven, weisen die morphologischen Erscheinungsformen anderer Vorkommen (vgl. v. a. KELLETTAT 1975) vielfach darauf hin, dass es sich bei den

Beachrockvorkommen eher um im Wesentlichen erhaltene, zementierte Akkumulationsformen, denn um rein erosiv gestaltete bzw. unter Sedimentbedeckung verhärtete und freigelegte Strukturen handelt, was auch im folgenden Punkt Bestätigung finden wird.

Neigung, Niveaus und Schichtung

Mit bis zu acht Niveaus sind die Beachrockvorkommen im Nord-Malé Atoll waagrecht gelagert oder ihre Oberflächen bis maximal 12° seewärtig geneigt. Die maximale Neigung entspricht in etwa der maximalen Neigung der luv-seitigen Strände mit ca. 10° (KLUG & PREU 1991). Die maledivischen Vorkommen nehmen gegenüber Vorkommen anderer Lokalitäten mit bis zu 15 Niveaus und seewärtigen Neigungen bis 20° keine Sonderstellung ein. Eine Schichtung, im Sinne eines sedimentologischen Unterschiedes zwischen den einzelnen Niveaus, ist bei fast allen Vorkommen deutlich zu erkennen und findet auch in der Literatur vereinzelt Erwähnung (u. a. GISCHLER & LOMANDO 1997, WEBB ET AL. 1999). Somit zeigt sich erneut, dass die unterschiedlichen Niveaus von ihrer Grundanlage her einzelne, durch hochenergetische Wellen verursachte Sedimentationsereignisse widerspiegeln und nicht ausschließlich das Ergebnis selektiv wirkender Erosions- oder Verwitterungsvorgänge sein können.

Überformung

Die Beachrockvorkommen auf den Malediven weisen, wie auch alle Vorkommen anderer Lokalitäten – sofern von den Autoren auf diesen Aspekt eingegangen wurde bzw. auswertbares Bildmaterial vorlag – überwiegend Anzeichen physikalischer Beanspruchung im Sinne mechanischen Überformung bzw. Zerstörung auf. Diese reicht vom abrasiven Überschleifen, über die Bildung kleiner Klüfte und Risse bis hin zum völligen Zerbrechen des Beachrock in einzelne Schollen. Weiterhin zeigen die Vorkommen, in großer Übereinstimmung mit der Literatur, Anzeichen starker biologischer Verwitterung mit z. B. der Ausbildung sog. „rock pools“ durch blaualgenweidende Schnecken (vgl. KELLETAT 1989). Die chemische Verwitterung spielt auf den Malediven, wie auch an anderen Lokalitäten, zumeist eine untergeordnete Rolle. Weder fanden sich bei den Untersuchten Vorkommen oberflächliche Verkarstungsanzeichen wie Rillen- oder Karrenbildung, noch Hinweise auf Kalklösungs- und Rekristallisationsprozesse innerhalb der Beachrocks. Die beschriebenen Anzeichen der Überformung der Vorkommen deuten darauf hin, dass sich Beachrock heutzutage nicht in einer Phase des Aufbaus sondern in einer Phase der Zerstörung befindet.

Zusammenfassung der Erkenntnisse

Aus den vorangegangenen Vergleichen ergeben sich folgende, stichpunktartig zusammengefasste Erkenntnisse:

- Die Beachrockvorkommen befinden sich in einem Prozess der Alterung bzw. teilweisen Zerstörung und werden rezent nicht gebildet.
- Die allgemeinen klimatischen und marinen Verhältnisse zum Zeitpunkt der Sedimentakkumulation waren ähnlich der rezenten, jedoch hat sich die altimetrische Position der Beachrockvorkommen seit ihrer Genese im Bezug auf den mittleren Meeresspiegel verschoben.
- Ausgangsmaterial und Korngrößen haben keinen Einfluss auf die Beachrockbildung, mit der Einschränkung, dass eine gewisse Permeabilität des Sedimentes für das Eindringen des gelösten Kalziumkarbonates gewährleistet sein muss. Somit ist die Mindestkorngröße bei grobschluffigen bis feinsandigen Körnungen anzusetzen.
- Die Korngrößenzusammensetzung der einzelnen Niveaus der Beachrockvorkommen können unterschiedlich, und verschieden zum heutigen, mobilen Strandmaterial sein
- Aragonit stellt den primären Zement dar und belegt damit den direkten Einfluss des Meerwassers auf die Zementierung
- Die vertikalen Erstreckungen stimmen meist nicht mit dem Tidenhub der jeweiligen Lokalitäten überein. Darüber hinaus stehen weder Tidenhub noch der heutige mittlere Meeresspiegel in einer direkten Beziehung zur vertikalen Erstreckung und altimetrischen Position der Beachrockvorkommen.
- Bei den Beachrockvorkommen handelt es sich um zementierte, auf Stränden bzw. Riffstrukturen abgelagerte Sedimentpakete und nicht um das Ergebnis der selektiven Freilegung von in den Strandsedimenten selbst entstandener Zementationsformen (wie z. B. bei REY ET AL. 2004 beschrieben).
- Die initiale Anlage der Akkumulationsformen wird durch einzelne, hochenergetische Wellenereignisse bzw. deren Abfolge bestimmt, die in Stärke und/oder Richtung von den lokalklimatischen Verhältnissen abweichen.

6.2 Beachrockgenese im Korallenarchipel der Malediven

Vor der Entwicklung eines Genesemodells für die Beachrockvorkommen auf den Malediven gilt es, das Bildungsmilieu, also die Beziehung des Entstehungsraumes zum mittleren Meeresspiegel, zu bestimmen. Generell stehen, wie eingangs der Arbeit erwähnt, drei potentielle Bildungsmilieus zur Verfügung: das Subtidal, das Intertidal (mit oder ohne Grundwasserbeeinflussung) und das Supratidal.

Das Subtidal scheidet nach den in Kapitel 1 bereits aufgeführten Argumenten aus. Darüber hinaus bildet der subtidale Bereich der Riffdächer auf den Malediven eine höchst dynamische Zone (wie auch an den häufigen Rippelbildungen zu erkennen war). Dies steht allerdings im Gegensatz zur Grundvoraussetzung für eine Zementierung, der Sedimentruhe.

Das Intertidal, das von der Mehrzahl der Autoren als Bildungsmilieu des Beachrock angenommen wird, erscheint nach den gewonnenen Ergebnissen ebenfalls als wenig wahrscheinlich. Gegen beide Intertidal-Varianten spricht, dass:

- alle Beachrockvorkommen deutliche Anzeichen mechanischer Zerstörung aufweisen.
- die vertikalen Erstreckungen nicht mit dem jeweiligen Tidenhub übereinstimmen und dabei meist darüber liegen.
- im Intertidal-Bereich auf den Malediven der, wie gezeigt wurde, nicht unerhebliche, uferparallele Sedimenttransport stattfindet und somit keine Sedimentruhe vorherrscht.
- die einzelnen Niveaus zum Teil sehr unterschiedliche Korngrößenspektren aufweisen. Zwar können auch Strände in ihrem vertikalen Aufbau Sedimentschichten unterschiedlicher Korngrößen aufweisen. Allerdings müsste dann die selektive Herauspräparierung des intertidal zementierten Materials exakt in den Bereichen der Korngrößenwechsel stattfinden. Auch dies erscheint, auf die gesamten Vorkommen bezogen, eher unwahrscheinlich.
- die unterschiedlichen vertikalen Erstreckungen der Luv-/Leelagen auf Inseln nicht durch den Tidehub zu erklären sind.

- falls der Beachrock intertidal gebildet wird, jedoch zwischen ca. 1.000 und 5.000 Jahren alt ist, der holozäne Meeresspiegel mehrfach (je nach Alter des jeweiligen Beachrock) das heutige Niveau erreicht haben müsste. Wie aus Abbildung 32 ersichtlich, würden für die Malediven nur die Meeresspiegelkurven von FAIRBRIDGE (1961) und CAMOIN ET AL. (1997) diese Bedingung in etwa erfüllen. Alle anderen Kurven zeigen eine mehr oder weniger kontinuierliche Transgression des Meeresspiegels während der letzten 7000 Jahre bis zum rezenten MSL bzw. eine Regression, bei den Kurven die von einem Meeresspiegelhochstand zwischen ca. 7.000 und 4.000 B.P. ausgehen.

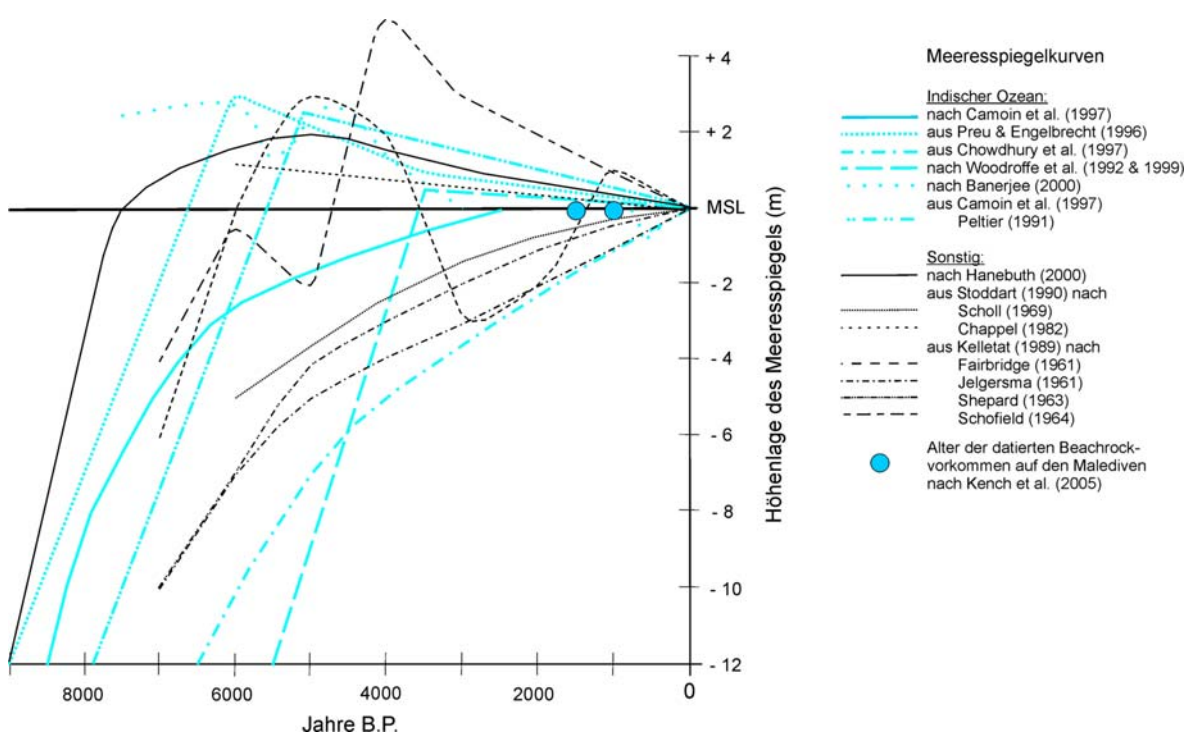


Abbildung 32: Ausgewählte Kurven der holozänen Meeresspiegelveränderungen

Für ältere Beachrockvorkommen zeigen zwar einzelne Kurven auch eine potentielle Intertidallage zum Genesezeitpunkt, jedoch müssten diese Vorkommen dann, nimmt man als Beispiel die Kurve von PELTIER (1991), über 5.000 Jahre in der Brandungszone gelegen haben. Wenn man die mechanische Zerstörung der relativ jungen Vorkommen der Malediven betrachtet, ist es zweifelhaft, ob es möglich ist, dass Beachrock eine solche Zeitspanne in der Brandungszone übersteht.

Darüber hinaus spricht Folgendes gegen eine Genese im Intertidal ohne Grundwasserbeteiligung:

- Falls eine Sedimentverhärtung durch Ausfällungsvorgänge in der Gezeitenzone stattfindet, müssten in der Verbreitzungszone des Beachrocks alle Lockersedimentstrände Vorkommen mit vertikalen Erstreckungen ähnlich des lokalen Tidenhubs aufweisen. Ein global-flächendeckender anthropogener Abbau ist wohl nicht anzunehmen.

Gegen eine Intertidalgenese mit Grundwassereinfluss sprechen weiterhin folgende Tatsachen:

- In der Mehrzahl der Fälle tritt Aragonit als Zement auf. Dieser ist eindeutig dem marinen Milieu zuzuordnen. Zwar könnte im Grundwasser-Meerwasser Mischbereich potentiell auch Aragonit ausfallen, dies jedoch nur bei Temperaturen von ca. 30°C oder mehr (bei niedrigeren Temperaturen wird bevorzugt Calcit abgeschieden), ein Temperaturbereich der mit ziemlicher Sicherheit außerhalb dessen für Grundwasser liegt. Darüber hinaus ist eine Transformation von Aragonit in Calcit möglich, nicht jedoch das Umgekehrte.
- die Sedimentverfestigung genau in jenem Strandbereich stattfinden soll (wenige cm. unter der Sedimentoberfläche) in der die auf den Lockersedimentkörpern der Inseln aufliegenden Beachrockvorkommen auf den Malediven (wie mehrfach festgestellt wurde) mit zunehmender Tiefe an Festigkeit verlieren.
- auch in ariden Gebieten (vgl. Abb. 28, S. 83) ohne bzw. mit nur sehr episodischen Grundwasservorkommen im Küstenbereich Beachrock auftritt.

Für weitere, u. a. aus archäologischen Fakten ermittelte, Belege gegen eine Beachrockgenese im Intertidal sei an dieser Stelle auf die Arbeiten von KELLETAT (1998 & 2006) verwiesen.

Wie erläutert wurde erscheint eine Intertidal-Genese als eher unwahrscheinlich. Vielmehr kann eine Genese im Supratidal nicht nur die höchst variablen morphologischen Erscheinungsformen der Beachrockvorkommen erklären, sondern bietet überdies die Grundvoraussetzungen für eine Sedimentzementierung:

- In Bereichen über der mittleren Hochwasserlinie herrscht ausreichend Sedimentruhe.
- Das zur Zementierung benötigte gelöste Kalziumkarbonat kann über Spritzwasser bzw. die auslaufenden Wellen in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt werden.
- Bedingt durch die Permeabilität des Sedimentes und seiner Lage in der vadosen Zone kann das Meerwasser ungehindert in den Sedimentkörper eindringen.
- Durch die subaerische Lage ist überdies ein Maximum an Evaporation gewährleistet.

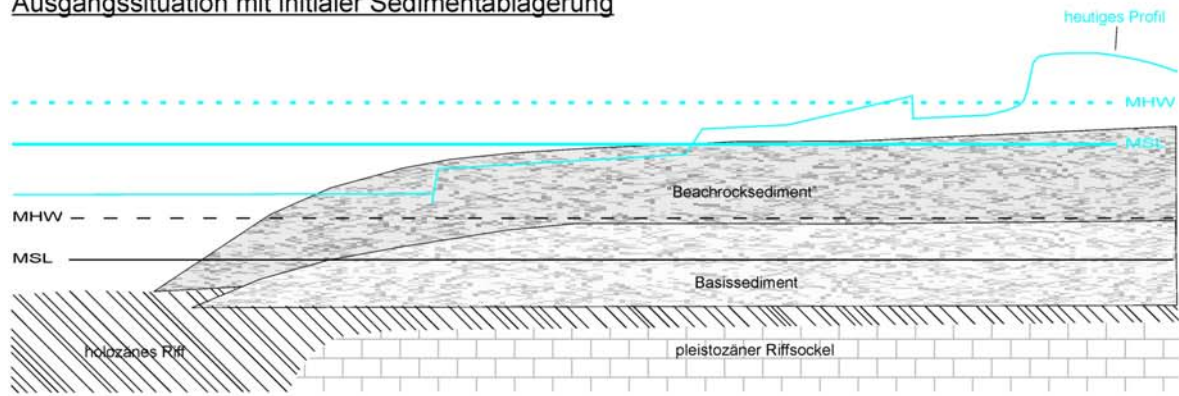
Anhand der oben aufgezeigten Rahmenbedingungen für eine supratidale Genese in Kombination mit den in Kapitel 6.1 dargestellten Ergebnissen lässt sich für die Beachrockvorkommen im Nord-Malé Atoll der Malediven folgendes schematisches Genesemodell ableiten (vgl. Abb. 33 S. 94). Als Grundlage dienen die von KENCH ET AL. (2005) erarbeiteten Daten zu den Sedimentaltern und den relativen Höhen der Riffdächer in Bezug auf die rezenten Verhältnisse. Des Weiteren wird von einer Meeresspiegeltransgression während der letzten Jahrtausende ausgegangen, die nach der Arbeit von CHOWDHURY ET AL. (1997) als höchstwahrscheinlich erscheint. Die aus seiner Arbeit ausgewählte Meeresspiegelkurve für den Indischen Ozean basiert nicht auf Beachrockbefunden, und ist somit „wertefrei“ bezüglich der altimetrischen Positionen von Beachrockvorkommen entstanden. Auch spiegelt die Morphologie der maledivischen Beachrocks eher eine Transgressionsfolge von Akkumulationen, denn eine Regressionsfolge wieder.

- (1) Ausgangssituation: Um ca. 5.500 B.P. hat sich auf dem pleistozänen Riffsockel bereits ein holozänes Riff gebildet, dessen Dachfläche ca. 2,5 m unter dem Niveau des heutigen mittleren Meeresspiegels lag. Darauf kam es bis ca. 3.700 B.P. zur Ablagerung der Basissedimente (KENCH ET AL. 2005) und deren Formung, entsprechend der vorherrschenden Strömungs- und Wellenregime.
- (2) Initiale Sedimentablagerung: Auf den bis an die Hochwasserlinie reichenden Basissedimenten kommt es, ausgelöst durch Wellenereignisse, die gegenüber dem „normalen“ Wellenregime deutlich höhere Energien aufweisen, zu einer Sedimentakkumulation über die Hochwasserlinie. Dabei darf die Ablagerung nicht

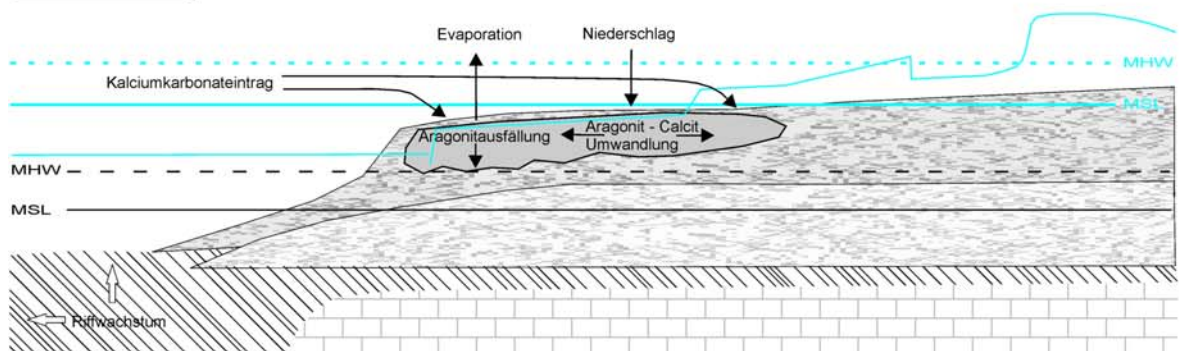
außerhalb der lokalen maximalen Einwirkreichweite des Spritzwassers bzw. der auslaufenden Wellen stattfinden.

- (3) Konsolidierung: Das Sedimentpaket wird nun entsprechend der periodisch auftretenden monsunalen Wellenregime mit Spritzwasser versorgt und episodisch, z. B. beim Zusammentreffen von Hochwasserständen und monsunalen Starkwindlagen bzw. bei „ausser-monsunalen“ Einzelsturmereignissen von den auslaufenden Wellen überspült. In beiden Fällen kommt es nach dem Einsickern des Meerwassers und dessen Evaporation zur Ausfällung von Aragonit in den Porenräumen und somit zu einer initialen Sedimentverfestigung. Der stete Wechsel zwischen Einsickern, Evaporation und Aragonitausfällung führt bei ungestörter Lagerung des Sedimentpaketes zu einer fortschreitenden Verfestigung und zur Bildung eines ersten Beachrockniveaus. Dabei unterliegt die Akkumulation bis zu ihrer völligen Zementierung sowohl der Überformung durch Wellen, als auch dem formenden Einfluss des Windes und der Niederschläge. Die Niederschläge können darüber hinaus bereits im Anfangsstadium eine Umwandlung des Aragonit in Calcit bewirken, sofern die Poren noch nicht geschlossen sind, also ein Eindringen des atmosphärischen Wassers möglich ist. Mehrmonatige Trockenperioden, wie sie für die maledivischen Inseln nicht untypisch sind, können dazu führen, dass die gesamte Zementierung des Sedimentpakets abgeschlossen ist, bevor Niederschlagswasser eindringen kann. Dies erklärt die Vorkommen bzw. Niveaus mit ausschließlich Aragonit als Zementart.
- (4) Niveaubildung: Ein Anstieg des Meeresspiegels verschiebt nicht nur die Einwirkreichweite des Spritzwassers bzw. der auslaufenden Wellen sondern auch das Akkumulationsniveau. Somit „wächst“ einerseits der Beachrock (ausreichendes Sediment vorausgesetzt) horizontal, andererseits wird durch erneute Sedimentakkumulation auf dem vorhandenen Beachrock und dessen Konsolidierung ein neues Beachrockniveau geschaffen. Abhängig von der Auftretshäufigkeit und der jeweiligen Energieniveaus der Wellenereignisse können somit, im Zuge eines weiteren Meeresspiegelanstiegs, aber auch nur durch eine weitere Erhöhung der Energieniveaus der einwirkenden Wellen, Vorkommen mit mehreren Niveaus entstehen.
- (5) Endsituation: Ein weiteres Ansteigen des Meeresspiegels bringt die Beachrockvorkommen in ihre heutige, intertidale Lage, in der sie der biogenen Erosion und mechanischen Zerstörung ausgesetzt sind.

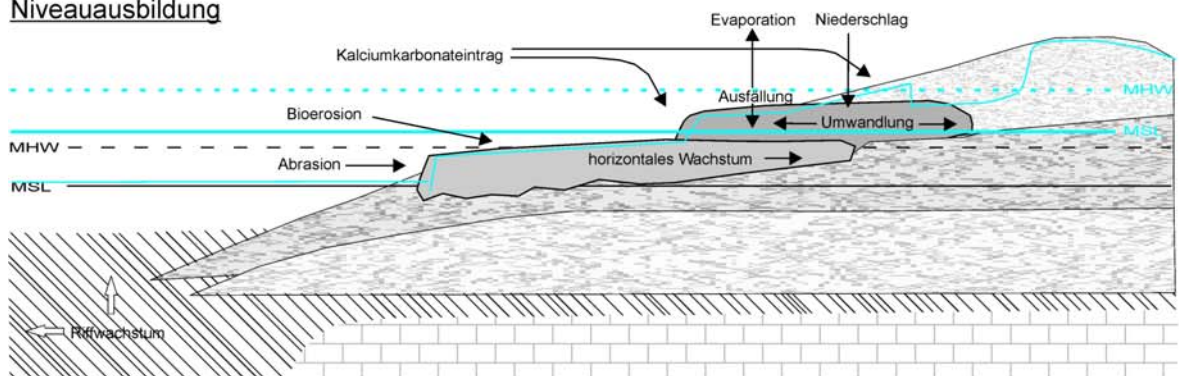
Ausgangssituation mit initialer Sedimentablagerung



Konsolidierung



Niveaue Ausbildung



Endsituation

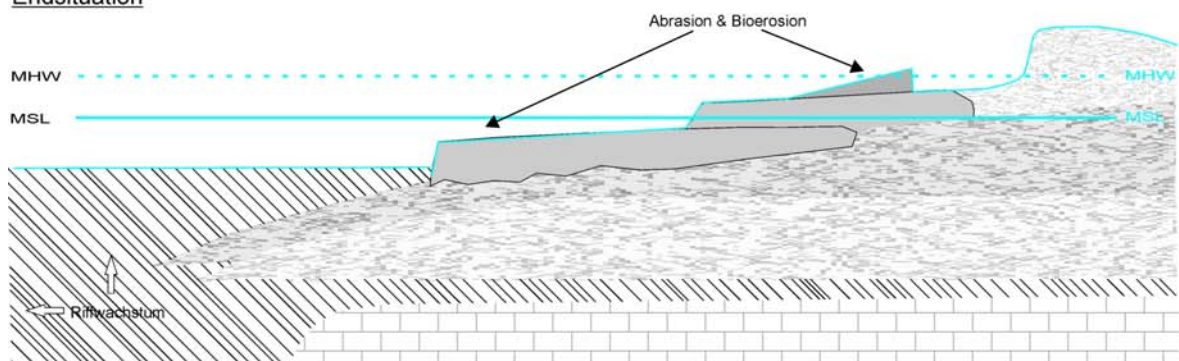


Abbildung 33: Schematisches Modell der supratidalen Beachrockgenese auf den Malediven

6.3 Bedeutung der Beachrockvorkommen für Inselmorphologie und Inseldynamik

Der Einfluss der Beachrockvorkommen im Korallenarchipel der Malediven für die Inselmorphologie und –dynamik muss in zweierlei Hinsicht betrachtet werden. Zum einen im Kontext der Inselgenese und zum anderen in seiner rezenten Bedeutung.

Generell betrachtet stellt der Beachrock einen Sedimentspeicher dar. Das bei der Beachrockgenese gebundene Sediment wurde den Lockersedimentkörpern der Inseln entzogen und stand somit nicht für Formungsprozesse wie die Erhöhung der Strandwälle oder die Uferformung zur Verfügung. Es wird jedoch durch die heute ablaufenden Desintegrationsprozesse der Beachrockvorkommen wieder dem Strandmilieu zugeführt. Da jedoch auf den Riffdächern und Lagunenböden ausreichend Detritus bereitgestellt wird – ein intaktes Riff vorausgesetzt – ist dieser Aspekt für Morphologie und Dynamik der Inseln eher zu vernachlässigen.

Für die Phase der Inselgenese zeigen die Beachrockvorkommen einen stabilisierenden, formgebenden und formerhaltenden Einfluss auf die Inseln.

Die auf dem Riffdach fußenden Beachrocks bildeten und bilden nicht nur eine Akkumulationsbasis für die Inselsedimente (vgl. Bild 10) und beeinflussten somit die initiale Form der Ablagerung, sondern schützten diese auch vor der Brandungseinwirkung, ebenso wie die später auf den Stränden gebildeten Beachrockvorkommen.

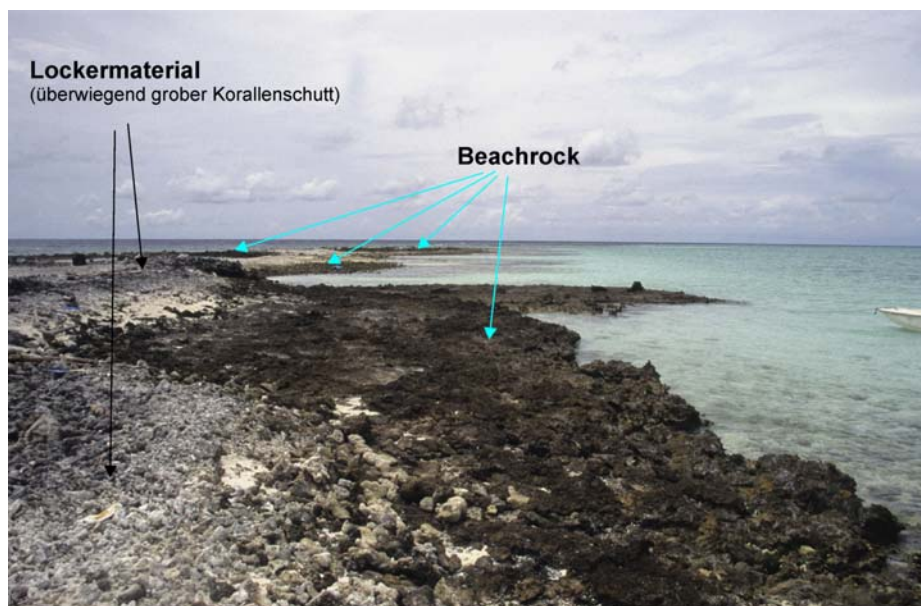


Bild 10: Beachrock als Akkumulationsbasis für Inselsedimente
(Vorkommen Winnikawandu 3, August 1994)

Die, den Lockersedimentkörpern der Inseln aufliegenden, Beachrocks stabilisieren nicht nur die Strände sondern konservieren deren Form bzw. bei Inseln mit umlaufenden Beachrockvorkommen die Form der gesamten Insel. Auch wenn sich vereinzelt die Lockersedimentkörper über die Beachrockvorkommen schieben, sei es nun dauerhaft oder nur periodisch im monsunalen Wechsel bzw. episodisch durch ein Sturmereignis, so bleibt dennoch die Kernform der Inseln erhalten.

Allerdings muss ein gebildeter Beachrock nicht zwangsläufig auch zu einer Inselbildung führen. So sind z. B. beim Vorkommen „Lately Rock“ (Testgebiet Südost) keine Anzeichen einer eventuell früher existierenden Insel zu erkennen. Vielmehr deutet seine Morphologie auf einen freiliegend verhärteten später überformten Strandwall hin. Des Weiteren ist auch eine Inselbildung ohne Beachrockbeteiligung möglich.

Durch die „Verschiebung“ der Beachrockvorkommen in eine intertidale Lage (vgl. Abb 34) hat sich auch deren Bedeutung für die Inselmorphologie aber vor allem für die Dynamik verändert.

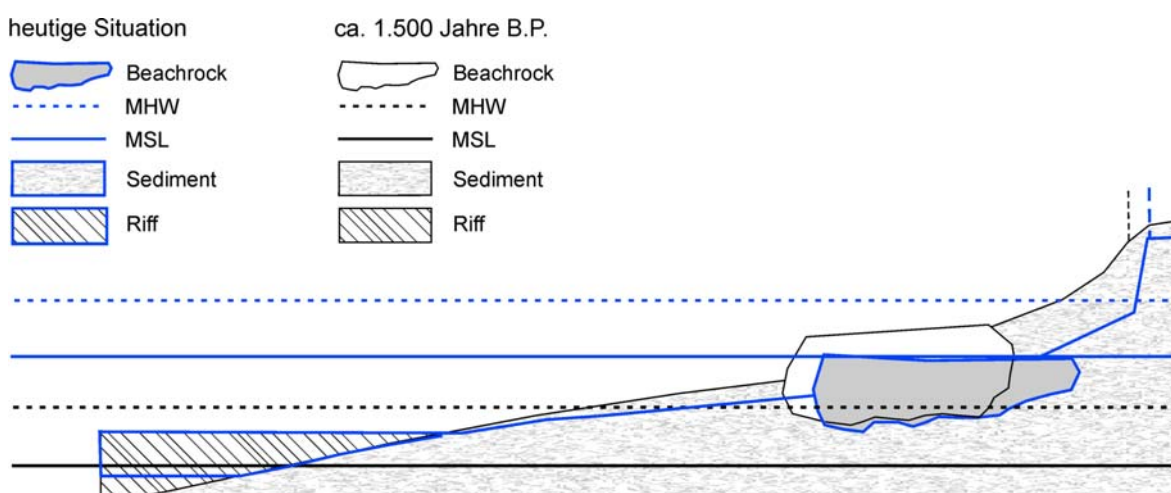


Abbildung 34: Beachrockvorkommen Helengeli 3 im Bezug zum spätholozänen und rezenten Meeresspiegel

Durch die Zerstörung der Beachrockvorkommen werden ehemals geschützte Strandpartien direkt dem Wellenregime ausgesetzt und verändern somit, zumeist dauerhaft, ihre vorher konservierte Form. Konnten die Beachrockvorkommen bei einem tiefer gelegenen Meeresspiegel die Inselkörper sogar vor Sturmwellen schützen, ist diese Funktion rezent verloren gegangen, wie die sehr häufig hinter den Vorkommen auftretenden Erosionskanten belegen. Diese liegen, mit Höhen bis zu einem Meter, meist im Wurzelbereich der Gehölzpflanzen, also bereits im Inselkern, und zeigen damit einen dauerhaften Sedimentverlust auf (vgl. Bild 11).



Bild 11: Stranderosion an der Nordwestseite der Insel Hembadoo (Beachrockvorkommen Hem 3, nach Sturmereignis freigelegt und teilweise zerstört; August 1994)

Kleinere, im Strandbereich auftretende Erosionskanten sind, monsunale bedingt nur periodisch vorhanden, und weisen nicht zwingend auf eine negative Verschiebung der Sedimentbilanz hin. Erschwerend zur Tatsache, dass die Beachrockvorkommen rezent keinen Schutz vor hochenergetischen Wellenereignissen bieten, kommt noch hinzu, dass sie durch ihre Lage im Strand- bzw. Vorstrandbereich eine Sedimentzufuhr zum Inselkörper unter den normalen, monsunalen Bedingungen letzten Endes sogar verhindern, also zusätzlich zur negativen Sedimentbilanz beitragen.

Aus obigen Gründen und in Anbetracht dessen, dass (die durch den Tsunami im Dezember 2004 verursachten Zerstörungen, wie in COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (2005) geschildert, ausgenommen) eine Vielzahl der Inseln in allen Atollen schwerwiegende Stranderosionen melden, kann vom Autor die positive Einschätzung bezüglich der Inselstabilität bei zukünftigem Meeresspiegelanstieg von KENCH ET AL. (2005) oder MÖRNER ET AL. (2003 & 2004) nicht geteilt werden.

Wenn man die gemeldeten, schwerwiegenden rezenten Stranderosionen allein für das Nord-Malé Atoll betrachtet (über die Hälfte der von Einheimischen bewohnten Inseln und knapp die Hälfte der Resorts melden nach UNEP 2002 starke Stranderosionen), die stabilisierende Wirkung der zur Zeit vorhandenen Beachrockvorkommen immer mehr nachlässt und davon ausgegangen werden muss, dass sich in absehbarer Zeit wohl keine neuen Beachrockvorkommen mehr bilden werden, erscheint das Überleben der Inselwelt, ohne technische Maßnahmen, mehr als fraglich.

7. Diskussion – offene Fragen

Auch wenn bei der Beprobung und den Analysen der Beachrocks auf relativ einfache Methoden zurückgegriffen werden musste und unter Berücksichtigung der eventuellen Fehler bei der Vermessung und Auswertung, so zeigt sich dennoch deutlich, dass eine Beachrockgenese im Intertidal, zumindest für die Malediven, auszuschließen ist. Vielmehr erweist sich die supratidale Genese unter dem Einfluss hochenergetischer Wellenereignisse als zutreffend. Obgleich versucht wurde alle potentiellen Steuerungsfaktoren die einen Einfluss auf die Beachrockgenese haben könnten mit in die Analysen auf zu nehmen, bleiben dennoch einige Fragen offen.

Welche Energieniveaus müssen die jeweiligen Wellen gehabt haben?

Für die Ablagerung der Beachrocksedimente steht nur ein begrenzter Strandbereich zur Verfügung. Findet die Akkumulation zu weit von der Uferlinie entfernt statt ist keine Kalziumkarbonatversorgung durch Spritzwasser und vor allem auslaufende Wellen gegeben. Liegt sie zu nahe an der Uferlinie kann das Sedimentpaket durch das normale Wellenregime wieder abgetragen werden. Erstere Situation deutet darauf hin, dass Energien auf dem Niveau von Tsunami-Wellen, betrachtet man sich die Auswirkungen des „2004 Tsunamis“ auf die Malediven, als zu hoch einzustufen sind. Zwar zeigen Tsunami-Ablagerungen ein ähnliches Bild wie viele Beachrocks mit größeren Komponenten in einer feineren Matrix, jedoch liegen dabei nicht nur die Größen und Massen der Blöcke deutlich über denen die bisher für Beachrocks beschrieben wurden, sondern es finden sich die Tsunami-Ablagerungen auch deutlich weiter von der Uferlinie entfernt, und in deutlich größeren Höhen über dem mittleren Meeresspiegel (vgl. KELLETAT & SCHELLMANN 2001, SCHEFFERS ET AL. 2005) als die bekannten Beachrockvorkommen.

Nicht nur für die „Akkumulationswelle(n)“ steht ein enges Energiefenster zur Verfügung. Auch die folgenden Wellen, die beim Auslaufen das Sedimentpaket mit Ozeanwasser versorgen, müssen die „passenden“ Energien besitzen. Sind sie zu schwach können sie die Akkumulation nicht überspülen, sind sie zu stark, wird das Sedimentpaket erodiert. Eine Überspülung durch auslaufende Wellen erscheint als notwendig. Spritzwasser alleine dürfte für eine Verfestigung, die wohl binnen Jahresfrist stattfinden kann (Aragonit – Calcit – Transformation !), nicht ausreichen.

Die Beachrockgenese ist somit an ein sensibles System aufeinander folgender Wellenereignisse mit höchst differenzierten Energieniveaus gekoppelt. Dies kann auch eine Erklärung dafür liefern, dass Beachrockvorkommen nicht flächendeckend an den tropischen bzw. subtropischen Stränden auftreten.

Warum findet zur Zeit keine (supratidale) Beachrockgenese statt?

Am plausibelsten erscheint, zumindest für die Malediven, zum einen die Annahme, dass die notwendigen Wellen auf Grund des fortschreitenden horizontalen und v. a. vertikalen Riffwachstums bereits beim Auftreffen auf die Riffkante bzw. beim Überqueren des Riffdachs in ihrer Energie so weit reduziert werden, dass sie nicht mehr in der Lage sind supratidale Akkumulationen aufzubauen. Zum anderen verhindern die, durch die monsunalen Wellenregime entstandenen, bis zu einem Meter hohen und bis in den vegetationsbestandenen Inselkern reichenden Erosionskanten eine entsprechende Sedimentablagerung.

Ein weiterer Grund könnte sein, dass die „bevorzugten“ topographischen Lagen bereits Beachrock beherbergen und dieser nun seinerseits zwar eine Sedimentablagerung im Supratidal zulässt, jedoch durch seine wellenbrechende Funktion eine ausreichende Durchfeuchtung des vorhandenen supratidalen Sediments verhindert.

Welcher Stellenwert ist den Beachrockvorkommen für die Ermittlung holozäner Meeresspiegel zuzuordnen?

Bis zu welcher maximalen Tiefe die Verfestigung im Sedimentpaket stattfindet - generell dürfte die vertikale Spanne sehr stark von der Permeabilität des Ausgangssubstrates und dem Verhältnis Meerwassereintrag/Niederschlag abhängen - kann nicht 100%-ig beantwortet werden, liegt auf den Malediven aber bei mindestens 60cm (z. B. Vorkommen Hembadoo 1 & Hembadoo 3). Dabei ist eine Verfestigungsspanne bis an bzw. knapp unter die Hochwasserlinie anzunehmen. Die Mächtigkeiten der einzelnen Niveaus hängen dabei letzten Endes primär von der Menge des abgelagerten Materials und dem Energieniveau der Wellenereignisse ab. Somit eignen sich höchstens die Fußlinien der untersten Niveaus als ungefähre Anzeiger für holozäne Hochwasserstände. Weder der gesamte Beachrock noch die einzelnen Niveaustufen weisen auf holozäne mittlere Meeresspiegel hin.

Hinzu kommt, dass sich ein „zu weit landwärts“ im Supratidal abgelagertes Sediment hunderte von Jahren außerhalb des direkten marinen Einflusses befinden kann, und somit eine große Zeitspanne zwischen Akkumulation (Sedimentalter) und Zementierung liegt.

In Anbetracht dessen sind Meeresspiegelkurven die, ausgehend von einer Genese im Intertidal, auf der Datierung von Beachrockvorkommen beruhen (z. B. RAMSAY 1996) bzw. den einzelnen Niveaus der Beachrockvorkommen direkt einen Meeresspiegel zuordnen, wie im Falle der Arbeiten von MÖRNER (2002 – 2004), mit Vorsicht zu betrachten.

Weiterhin konnte nicht geklärt werden, in wieweit mikrobiologische Aktivitäten einen Beitrag zur Sedimentzementierung liefern können. Es ist ebenfalls nicht auszuschließen, dass bei Beachrockvorkommen anderer Lokalitäten eventuell auch im Supratidal austretendes Grundwasser seinen Beitrag zur Genese leistete. Dennoch ist zweifelsfrei dem marinen Input die ausschlaggebende Funktion zuzuordnen. Hierbei könnten unter Umständen sogar die, z. B. von den Bahamas und dem Persischen Golf beschriebenen „whitings“ (Aragonit ausfällungen im oberflächennahen Meerwasser) eine Rolle spielen.

Zur endgültigen Klärung der Frage nach den Prozessen die letzten Endes zur Beachrockbildung führen erscheinen weitergehende morphologische Untersuchungen im interdisziplinären Kontext mit der Aufschließung der Vorkommen durch Bohrungen bzw. deren kompletter Durchtrennung, um Einblicke in das Innere der Beachrocks erlangen zu können, die beste Möglichkeit darzustellen. Auch in Anbetracht der entdeckten Vaterit-Bestandteile in der Beachrockmatrix ist ein interdisziplinäres Vorgehen unumgänglich. Es ist nicht anzunehmen, dass durch erneute bzw. wiederholte rein chemische, mineralogische oder biologische Analysen bzw. Laborversuche neue, entscheidende Erkenntnisse gewonnen werden können.

Literatur

- ADAM, D.D. (1984): Report to the Government of the Maldives Islands on Floral Identification. Report Nr. RAS/79/123. Rome:FAO
- ALEXANDERSSON, T. (1969): Recent littoral and sublittoral High-Mg Calcite lithification in the Mediterranean. *Sedimentology*, Band 12, S. 47-61.
- ALEXANDERSSON, T. (1972): Mediterranean beachrock cementation: Marine Precipitation of Mg-Calcite. In: STANLEY, D.J. (Hrsg.): The mediterranean Sea, Stroudsburg, S. 203-223
- AMIEUX, P., BERNIER, P., DALONGEVILLE, R. & MEDWECKI, V. (1989): Cathodoluminescence of carbonate cemented Holocene beachrock from the Togo coastline (West Africa): an approach to early diagenesis. *Sedimentary Geology*, Band 65 (3-4), S. 261 – 272.
- ANDERSON, R.C. (1998): Submarine topography of Maldivian atolls suggests a sea level of 130m below present at the last glaciation maximum. *Coral Reefs*, Band 17 (4), S. 339 - 341
- ARNBERGER, E. & ARNBERGER, H. (1988): Die tropischen Inseln des Indischen und Pazifischen Ozeans. Wien.
- AUBERT, O. & DROXLER, A.W. (1992): General Cenozoic Evolution of the Maldives Carbonate System. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, Nr. 8, S. 1295 – 1300.
- AVRAHAM, Z.B. & BUNCE, E.T. (1977): Geophysical Study of the Chagos-Lakkadive Ridge, Indian Ocean. *Bull. Centers Rech. Explor.-Prod. ELF Aquitaine*, Vol.16, Nr.1, S. 113-136.
- BANERJEE, P.K. (1993): Imprints of late Quaternary climatic and sea level changes on east and south Indian coast. *Geo-Marine Letters*, Band 13 (1) S. 56 – 60.
- BARNERJEE, P.K. (2000): Holocene and late Pleistocene relative sea level fluctuations along the east coast of India. *Marine Geology*, Band 167 (3-4), S. 243 – 260.
- BATHURST, R.G.C. (1976): Carbonate sediments and their diagenesis. Developments in Sedimentology, Band 12, New York.
- BEIER, J.A. (1985): Diagenesis of Quaternary Bahamian beachrock: petrographic and isotopic evidence; *Journal of Sedimentary Petrology* Vol. 55, S. 75 – 761
- BERDIN, R.D., SIRINGAN, F.P. & MAEDA, Y. (2004): Holocene sea level highstand and its implications for the vertical stability of Pangalo Island, southwest Bohol, Phillipines. *Quaternary Intenational*, Band 115, S. 27 – 37.
- BERNABEU, A.M., MEDINA, R. & VIDAL, C. (2003): A morphological model of beach profile integrating the wave and tidal influence. *Marine Geology*, Vol. 197 (4); S. 95-116
- BIRD, E.C.F. (1984): Coasts: An Introduction to Systematic Geomorphology. London.
- BOURGEOIS, J. (1978): Beachrock. In: FAIRBRIDGE, R.W. (Hrsg.): The Encyclopedia of Sedimentology, Encyclopedia of Earth Sciences, Vol. VI, S.44 f, Stroudsburg, PA.
- BOURROUILH-LE JAN, F.G. (1998): The role of high-energy events (hurricanes and/or tsunamis) in the sedimentation, diagenesis and karst initiation of tropical shallow water carbonate platforms and atolls. *Sedimentary Geology*, Vol. 118, S. 3-36

- BRICKER, O.P. (Hrsg.) (1971): Carbonate cements. Studies in Geology, Band 19, John Hopkins University, Baltimore.
- BROWNLOW, A. H. (1979): Geochemistry. London
- BRÜCKNER, H. (1988): Indicators for formerly higher sea levels along the east coast of India and on the Andaman Islands.
Hamburger Geographische Studien, Band 44, S. 47-72.
- BUCZYNSKI, C. & CHAFETZ, H.S. (1993): Habit of bacterially induced precipitates of calcium carbonate: examples from laboratory experiments and recent sediments. In: REZAK, R. & LAVOIE, D.L. (Hrsg.): Carbonate Microfabrics. New York; S. 105-16
- BUDEMEIER, R.W. & SMITH, S.V. (1988): Coral reef growth in an era of rapidly rising sea level: predictions and suggestions for long-term research.
Coral Reefs, Band 7, S. 51-56.
- CAMOIN, G.F., COLONA, M., MONTAGGIONI, L.F., CASANOVA, J., FAURE, G. & THOMASSIN, B.A. (1997): Holocene sea level changes and reef development in the southwestern Indian Ocean;
Coral Reefs, Vol. 16, S. 247 – 259
- CALDAS, L.H.DE.O. (2002): Late Quaternary coastal evolution of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. Dissertation, Universität Kiel.
- CALVET, F., CABRERA, M.C., CARRACEDO, J.C., MANGAS, J., PÉREZ-TORRADO, F.J., RECIO, C. & TTRAVÉ, A. (2003): Beachrocks from the island of La Palma (Canary Islands, Spain).
Marine Geology, Band 167 (1-4), S. 75 – 93
- CHAVE, K.E., SMITH, S.V. & ROY, K.J. (1972): Carbonate Production by coral reefs.
Marine Geology, Band 12, S. 123 - 140
- CHOWDHURY, S.Q., HAQ, A.T.M.F. & HASAN, K. (1997): Beachrock in St. Martins Island, Bangladesh: Implications of sea level changes on beachrock cementation.
Marine Geology, Band 20 S. 89 – 104.
- COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (HRSG.) (1999): Pulu Keeling National Park – Plan of Management. Darwin
- COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (HRSG.) (2005): An assessment of damage to maldivian coral reef and baitfish populations from the Indian Ocean tsunami. Canberra
- COOPER, J.A.G. (1991): Beachrock formation in low latitudes: implications for coastal evolutionary models.
Marine Geology, Band 98, S. 145 – 154.
- CPSL (HRSG.) (2001): Final report of the trilateral working group on Coastal Protection and Sea Level Rise. *Wadden Sea Ecosystems*, Band 13, Wilhelmshaven.
- DAVIES, P.J. AND KINSEY, D.W. (1973): Organic and inorganic factors in recent beachrock formation, Heroin Island, Great Barrier Reef.
Journal of Sedimentary Petrology Vol. 43, S. 59 – 81
- DAVIES, S.P., STODDART, D.R. & SIGEE, D.C. (1971): Reef forms of Addu Atoll, Maldives Islands. In: STODDART, D.R. & YOUNGE, M. (Hrsg.): Regional variation in Indian Ocean coral reefs.
Symposia of the Zoological Society of London, Nr. 28, S. 217 – 258.
- DELIBRIAS, G. & PIRAZZOLI, A. (1983): Late Holocene sea level changes in Yoron Island, Japan.
Marine Geology, Band 53 (1-2), S. 7 – 16.

- DESAI, B.N. (HRSG.) (1993): *Oceanography of the Indian Ocean*. Rotterdam.
- DICKSON, W.R. (1999): Holocene sea-level record on Funafuti and potential impact of global warming on central Pacific atolls.
Quaternary Research, Vol. 51, S. 124-132
- DIETRICH, G., KALLE, K., KRAUSS, W. & SIEDLER, G. (1975): *Allgemeine Meereskunde*, Berlin, Stuttgart.
- EASTON, W.H. (1974): An unusual inclusion in Beachrock.
Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 44, S. 693-694
- EIBL-EIBESFELD, I. (1982): *Die Malediven – Paradiese im Indischen Ozean*. München.
- EL-SAYED, M.K. (1988): Beachrock cementation in Alexandria, Egypt.
Marine Geology, Band 80 (1-2), S. 29 – 35.
- ENGELBRECHT, C. & PREU, C. (1993): Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von SPOT- und MOMS-01-Daten zur Erfassung und Bewertung von tropischen Koralleninseln und –riffen, dargestellt an Beispielen aus den Malediven.
In: BIRKENHAUER, J. et. Al (Hrsg.): *Beiträge zur Geographie der Meere und Küsten Vorträge der 9. Jahrestagung in München*.
Münchner Geographische Abhandlungen, Band 13, S. 1 – 13, München.
- ENGELBRECHT, C. (1999): Anwendbarkeit manueller und automatisierter Auswertung von multispektralen SPOT-Daten zur Analyse der Relief- und Nutzungsstrukturen im Nord-Male Atoll (Malediven) – auf der Basis eines landschaftsökologisch-integrativen Forschungsansatzes (LIA). Dissertation, Hochschule Vechta.
- FAIRBRIDGE, R. W. (HRSG.) (1966): *The Encyclopedia of Oceanography*.
Encyclopedia of Earth Sciences Series, Volume I Stroudsburg, PA.
- FAIRBRIDGE, R. W. (HRSG.) (1968): *The Encyclopedia of Geomorphology*.
Encyclopedia of Earth Sciences series , Volume III Stroudsburg, PA.
- FAIRBRIDGE, R. W. (HRSG.) (1978): *The Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Sciences*.
Encyclopedia of Earth Sciences series , Volume IV A Stroudsburg, PA.
- FONSEKA, R.N. & BALASUBRAMANIAM, S. (1984): *An index of Maldivian names to plants and vegetable products of Male and other islands of the North Male Atoll Male, Republic of Maldives*
- FONSEKA, R.N. & BALASUBRAMANIAM, S. (1984): *An illustrated account of some maldivian plants*. Male, Republic of Maldives
- FOSBERGER, F.R. (1976): Coral island vegetation. In: JONES, O. A. & ENDEAN, R. (Hrsg.): *Biology and Geology of coral reefs*. Volume III, S. 255 - 278, London.
- FRIEDMANN, G.M., SANDERS, J.E., GAVISH, E. & ALLEN, R.C. (1971): Marine lithification yields rock resembling beachrock. In: BRICKER, O.P. (HRSG.): *Carbonate cements*.
Studies in Geology, Band 19, S. 50-51; John Hopkins University, Baltimore.
- FÜCHTEBAUER, H. & RICHTER, D. K. (1988): *Karbonatgesteine*. In: FÜCHTEBAUER, H. (Hrsg.): *Sedimente und Sedimentgesteine; Sediment-Petrologie Teil II*, S. 233 - 455, Stuttgart.
- GEYH, M. A. & SCHLEICHER, H. (1990): *Absolute age determination – physical and chemical dating methods and their application*. New York.
- GIERLOFF-EMDEN, (1980): *Geographie des Meeres – Ozeane und Küsten; Teil 1 & 2*.
In: SCHMITHÜSEN, J. (Hrsg.): *Lehrbuch der allgemeinen Geographie*, Band 5, Berlin.

- GINSBURG, R.N. (1953) Beachrock in south Florida;
Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 23, S. 85-92
- GISCHLER, E.G. & LOMANDO, A.J. (1997): Holocene cemented beach deposits in Belize.
Sedimentary Geology, Band 110 (3-4), S. 277 – 297.
- GIVEN, R.K. & WILKINSON, B.H. (1985): Kinetic control of morphology, composition, and mineralogy of abiogenic sedimentary carbonates.
Journal of Sedimentary Petrology Vol. 5, S. 109 – 119.
- GOREAU, T. (1961): Wachstum und Kalkanlagerung bei Riffkorallen.
Endeavour, Band XX, S. 32 - 40
- GORNITZ, V. (1993): Mean sea level changes in the recent past. In: WARRICK, R.A., BARROW, E.M. & WIGLEY, T.M.L. (HRSG.): Climate and sea level change: observations, projections and implications. S. 25 – 44. Cambridge.
- HANEBUTH, T.J.J. & STATTEGGER, K. (2003): Depositional sequences on a late pleistocene – olocene tropical siliclastic shelf (Sunda Shelf, southeast Asia).
online – Version. *Journal of Asian Earth Sciences*. (In Druck)
- HANEBUTH, T.J.J. (2000): Sea-level changes on the Sunda shelf during the last 50.000 years. *Berichte des Instituts für Geowissenschaften*, Universität Kiel, Band 12, Kiel.
- HANEBUTH, T.J.J., STATTEGGER, K., SCHIMANSKI, A., LÜDMANN, T. & WONG, H.K. (2003): Late Pleistocene forced-regressive deposits on the Sunda Shelf (southeast Asia).
Marine Geology, Band 199(1-2), S. 139 – 157.
- HANOR, J.S. (1978): Precipitation of beachrock cements: mixing of marine and meteoric waters vs. CO₂-degassing.
Journal of Sedimentary Petrology, Band 48 (2), S. 489 – 501.
- HASTENRATH, S. & LAMB, P.J. (1979): Climatic atlas of the Indian ocean. Part I: Surface climate and atmospheric circulation. Wisconsin.
- HILLGÄRTNER, H., DUPRAZ, C. & HUG, W. (2001): Microbially induced cementation of carbonate sands: are micritic meniscus cements good indicators of vadose diagenesis? *Sedimentology*, Band 48, S. 117 – 131.
- HOLAIL, H. & RASHED, M. (1992): Stable isotopic composition of carbonate-cemented recent beachrock along the Mediterranean and Red Sea coasts of Egypt.
Marine Geology, Band 106, S. 141 – 148.
- HOPLEY, D. (1986): Beachrock as sea-level indicator. In: PLASSCHE, O. van de (Hrsg.): Sea-level Research: A manual for the collection and evaluation of data. Norwich: Geo Books; S. 157-173.
- HOPLEY, D. (2002): Coral reefs. In: SCHWARTZ, M.L. (Hrsg.): Encyclopedia of coastal Science; Amsterdam.
- HORTON, B.P., LARCOMBE, P., WOODROFFE, S.A., WHITTAKER, J.E., WRIGTH, M.R. & WYNN, C. (2003): Contemporary foraminiferal distributions of a mangrove environment, Great Barrier Reef coastline, Australia: implications for sea level reconstructions.
Marine Geology, Band 198 (3-4), S. 225 – 243.
- JONES, B. & GOODBODY, Q.H. (1984): Biological alteration of beachrock on Grand Cayman islands, British West Indies.
Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Vol. 32, Nr. 2, S. 201 – 205.
- JONES, B. (1987): The alteration of sparry calcite crystals in a vadose setting, Grand Cayman Islands.
Canadian Journal of Earth Science, Band 24, S. 2292 – 2304.

- KATUPOTHA, J. & FUJIWARA, K. (1988): Holocene sea level change on the southwest and south coast of Sri Lanka.
Paleography, Paleoclimatology, Paleoecology, Band 68 (2-4), S. 189 – 203.
- KENCH, P.S., MCLEAN, R.F. & NICHOL, S.L. (2005): New model of reef-island evolution: Maldives, Indian Ocean.
Geology, Band 33 (2), S. 145 – 148.
- KELLETAT, D. (1975): Beobachtungen an holozänen Beachrock-Vorkommen des Peloponnes, Griechenland. In.: BÜDEL, J. und HAGEDORN, H. (Hrsg.): Dynamische Geomorphologie; *Würzburger Geographische Arbeiten*, Band 43, S. 44 – 54.
- KELLETAT, D. & ZIMMERMANN, L. (1991): Verbreitung und Formentypen rezenter und subrezenter organischer Gesteinsbildungen an den Küsten Kretas.
In: HENKEL, G. (Hrsg.): *Essener geographische Arbeiten*, Band 23. Paderborn.
- KELLETAT, D. (1987): Küstenforschung.
Geographische Rundschau, Jg. 39, Heft 1, S. 4 - 12, Braunschweig
- KELLETAT, D. (1989): Biosphere and man as agents in coastal geomorphology and ecology.
Geoökodynamik, Band 10, S. 215 – 252, Bensheim.
- KELLETAT, D. (1989): Physische Geographie der Meere und Küsten: eine Einführung. Stuttgart.
- KELLETAT, D. (1995): Die natürlichen geographischen Küstenzonen der Erde - wenig gesicherte Erkenntnisse und viele offene Fragen. In: RADTKE, U. (Hrsg.): Vom Südatlantik bis zur Ostsee – neue Ergebnisse der Meeres- und Küstenforschung, Beiträge zur 13. Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten 25.-27.5.1995 in Köln,
Kölner Geographische Arbeiten, Band 66, S. 1-8.
- KELLETAT, D. (1995): Atlas of coastal geomorphology and zonality.
Journal of Coastal Research, Special Issue No. 13.
- KELLETAT, D. (1998): Beachrock sensu stricto – Anmerkungen aus geomorphologischer Sicht. In: BÄHR, J. (Hrsg.): Beiträge zur Küsten- und Meeresgeographie,
Kieler Geographische Schriften, Band 97, S. 205 – 224; Kiel.
- KELLETAT, D. & SCHELLMANN, G. (2001): Sedimentologische und geomorphologische Belege starker Tsunami-Ereignisse jung-historischer Zeitstellung im Westen und Südosten Zyperns. In: KELLETAT, D. & SCHELLMANN, G. (Hrsg.): Küstenforschung auf Zypern – Tsunami-Ereignisse und chronostratigraphische Untersuchungen;
Essener Geographische Arbeiten, Band 32, S. 1 – 74, Essen.
- KELLETAT, D. (2003): Tsunami durch Impacts von Meteoriten im Quartär?
In: KELLETAT, D. (Hrsg.): Neue Ergebnisse der zur Küsten- und Meeresforschung,
Essener Geographische Arbeiten, Band 35, S. 27 – 38; Essen.
- KELLETAT, D. (2006): Beachrock as Sea-Level indicator ? – Remarks from a geomorphological point of view. *Journal of Coastal Research*, (in Druck)
- KINDLER, P. & BAIN, R.J. (1993): Submerged upper Holocene beachrock on San Salvador Island, Bahamas. Implication for recent sea-level history.
Geologische Rundschau, Nr. 82, S. 241-247
- KLUG, A.-C. & PREU, C. (1993): Geomorphologische Strukturen und morphologische Prozesse der Korallenriffinseln im Nord-Male Atoll, Malediven.
In: BIRKENHAUER, J. et. al. (Hrsg.): Beiträge zur Geographie der Meere und Küsten Vorträge der 9. Jahrestagung in München.
Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band 13, S. 15 – 26.

- KLÜFERS, P. (2005): Biomineralisation
Vorlesungsskript (Internetreport), Lehrstuhl für Bioorganische Chemie und Koordinationschemie, LMU München.
- KNEALE, D. & VILES, H.A. (2000): Beach cement: incipient CaCo₃ – cemented beachrock development in the upper intertidal zone, North Uist, Scotland.
Sedimentary Geology, Band 132 (3-4), S. 165 – 170.
- KOMAR, P.D. (1976): Beach processes and sedimentation. New Jersey.
- MASON, B. & MOORE, C.B. (1985): Grundzüge der Geochemie. Stuttgart.
- MENARD, H. W. (1987): Inseln – Geologie und Geschichte vom Land im Meer.
Heidelberg
- MEYERS, J.H. (1987): Marine vadose beachrock cementation by cryptocrystalline magnesian calcite – Maui, Hawaii.
Journal of Sedimentary Petrology, Band 57 (3), S. 558 – 570.
- MINISTRY OF FISHERIES, AGRICULTURE & MARINE RESOURCES (HRSG.) (2003): Integrated coastal zone management (ICZM) strategy and plan (Faafu Atoll).
Male, Republic of Maldives.
- MINISTRY OF FISHERIES, AGRICULTURE & MARINE RESOURCES (HRSG.) (2002):
“1th Maldives Coral Reef Forum”, Internet-Report (ohne nähere Literaturangaben)
- MOORE, C.H. (1973): Intertidal carbonate cementation Grand Cyman, West Indies.
Journal of Sedimentary Petrology Vol. 43, S. 591 – 602.
- MOORE, C.H. (1977): Beachrock origin: some geochemical, mineralogical and petrographic considerations.
Geoscience and man, Vol. 28, S. 155 – 163.
- MÖRNER, N.-A. (2000): Sea level changes and coastal dynamics in the Indian Ocean.
Integrated Coastal Zone Management, Band 1 (1), S. 17 – 20.
- MÖRNER, N.-A. (2002): Sea level changes in the Maldive islands. Internet-Report.
- MÖRNER, N.-A., LABOREL, J., TOOLEY, M., DAWSON, S., ALLISON, W., ISLAM, M.S., COLLINA, J. & RUFIN, C. (2003): Sea level changes: The Maldives Projekt – Freed from Condemnation to become flooded. Final Conference, Project IGCP 437, Research Publication, Band 4, S. 175 – 176; Puglia, Italien.
- MÖRNER, N.-A. (2004): Estimating future sea level changes from past records.
Global and Planetary Change, Band 40 (1-2), S. 49 – 54.
- MÖRNER, N.-A., TOOLEY, M. & POSSNERT, G. (2004): New perspective for the future of the Maldives. *Global and Planetary Change*, Band 40 (1-2), S. 177 – 182.
- MORSE, J.W. & MACKENZIE, F.T. (1990): Geochemistry of sedimentary carbonates.
Developments in Sedimentology, Band 48, New York.
- MPE (HRSG.) (1995): Ministry of Planing and Environment – Statistikal Yearbook of the Maldives, Male, Republik of the Maldies.
- MTPB (HRSG.) (2005): Maldives Tourism Promotion Board, Internetreport.
- MÜLLER-PARKER, G. (2002): Coral reef islands. In: SCHWARTZ, M.L. (Hrsg.): Encyclopedia of coastal Science; Amsterdam.
- NATIONAL MARITIME MUSEUM (Hrsg.) (1988): West Coast of India Pilot Nr. 38
– monthly surface current circulation; Greenwich London.

- NEUMEIER, U. (1999): Experimental modelling of beachrock cementation under microbial influence.
Sedimentary Geology, Band 126 (1-4), S. 35 – 46.
- NUGLISCH, K. (1985): Foraminiferen – marine Mikroorganismen. Wittenberg Lutherstadt.
- ORME, G.R. (1977): Aspects of sedimentation in the coral reef environment.
in: JONES, O.A. & ENDEAN, R. (Hrsg.): *Biology and Geology of coral reefs*.
Volume IV, S. 129 - 177 London.
- PREU, C. & ENGELBRECHT, C. (1991): Patterns and processes shaping the present morphodynamic of coral reef islands – Case study from the North-Male Atoll , Maldives (Indian Ocean). In: BRÜCKNER, H. & RADTKE, U. (Hrsg.): *Von der Nordsee bis zum Indischen Ozean*, S. 209 – 220; Stuttgart.
- PREU, C., & ENGELBRECHT, C. (1993): Die Bedeutung der Interglazial-Glazial-Interglazial-Zyklen des Quartärs für die Reliefgenese der maledivischen Atolle – dargestellt am Beispiel des Nord-Male Atolls.
Berliner Geographische Arbeiten, Band 79, S. 106-132.
- PREU, C., BÄUERLE, H., ENGELBRECHT, C., KLUG, A.-C., SCHWARZER, K., STEINMETZ, M. & WINTERHOLLER, A.J. (1994): Problemstellung, Zielsetzung und erste Ergebnisse des internationalen und interdisziplinären Forschungsprojektes " Environmental Conservation and Nature Protection of the Maldives/Indian Ocean.
Hannoversche Geographische Arbeiten, Band 48, S. 43 - 52, Hannover.
- PREU, C., ENGELBRECHT, C. & WINTERHOLLER, A. J. (1994): Synoptisch-dynamische Typisierung der Inseln des tropischen Indik als Basis für einen methodischen Ansatz von Konzeption und Übertragbarkeit einer „sustainable development strategy“ – dargestellt am Beispiel des maledivischen Archipels.
Greifswalder Geographische Arbeiten, Band 10, S. 50 – 58.
- PURDY, E.G. (1981): Evolution of the Maldivian atolls, Indian Ocean.
Proceedings of the 4th International Coral Reef Symposium,
Vol. 1, S. 659-674, Manila
- PURDY, E.G. & BERTRAM, G.T. (1993): Carbonate concepts from the Maldives, Indian Ocean. *AAPG Studies in Geology* Band 34, Tulsa.
- PYÖKÄRI, M. (1982): Beachrock on Pattaya Beach, southeastern Thailand.
Zeitschrift für Geomorphologie, Band 26 (3), S. 375 – 388.
- RAO, K.M. & RAO, T.C.S. (1994): Holocene sea levels of Viskhapatnam Shelf, east coast of India. *Journal of the Geological Society of India*, Band 44, S. 685 – 689.
- RAMSAY, P.J. (1996): 9000 years of sea level change along the southern African coastline. *Quaternary International*, Band 31, S. 71 – 75.
- REY, D., RUBIO, B., BERNABEU, A.M. & VILAS, F. (2004): Formation, exposure and evolution of a high latitude beachrock in the intertidal zone of the Corrubedo complex (Ria de Arousa, Galicia, NW Spain).
Sedimentary Geology, Band 169 (1-2), S. 93 – 105.
- ROSEN, B.R. (1971): The distribution of reef coral genera in the Indian Ocean.
In: STODDART, D.R. & YOUNGE, M. (Hrsg.): *Regional variation in Indian Ocean coral reefs*. *Symposia of the Zoological Society of London*, Nr. 28, S. 263 – 298.
- RUSSEL, R.J. (1959): Caribbean Beachrock observation;
Zeitschrift für Geomorphologie N.F. 3, S. 227-236
- RUSSEL, R.J. (1962): Origin of Beachrock;
Zeitschrift für Geomorphologie N.F. 6, S. 1 – 16

- SCHEFFERS, A. (2003): Boulders on the move: Beobachtungen aus der Karibik und dem westlichen Mittelmeer. In: KELLETAT, D. (Hrsg.): Neue Ergebnisse der zur Küsten- und Meeresforschung, *Essener Geographische Arbeiten*, Band 35, S. 3 – 10; Essen.
- SCHEFFERS, A., SCHEFFERS, S. & KELLETAT, D. (2005): Paleo-Tsunami Relics on the Southern and Central Antillean Island Arc. *Journal of Coastal Research*, Vol. 21(2), S. 263 - 273
- SCHILLINGS, R. W. (1994): Rezente Beachrockbildung des marin-meteorischen Mischbereichs in Strandgrundwässern Griechenlands. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, Heft 42, Bochum.
- SCHIPULL, K. (1988): Beachrock im Süden von Tenerife, Kanarische Inseln. In: Schipull, K. & Thannheiser, D. (Hrsg.): Neue Ergebnisse der Küstenforschung. Beiträge zur 6. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten“. *Hamburger Geographische Schriften*, Heft 44, S. 85 – 98, Hamburg.
- SCHMALZ, R.F. (1971): Formation of Beachrock at Eniwetok Atoll. In: BRICKER, O.P. (HRSG): Carbonate cements. *Studies in Geology*, Band 19, S. 19 - 24; John Hopkins University, Baltimore.
- SCHREIBER, U. et al. (2002): Apparent light requirement for activation of photosynthesis upon rehydration of desiccated beachrock microbial mats. *Journal of Phycology*, Band 38, S. 125 – 134
- SCHUMACHER, H. (1991): Korallenriffe – Verbreitung, Tierwelt, Ökologie. München.
- SCHUHMACHER, H. & HINTERKIRCHER, J. (1996): Niedere Meerestiere. München.
- SCHWARTZ, M. L. (HRSG.) (1986): The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Volume XV, Stroudsburg.
- SCHWARZER, K. (1993): Erste Ergebnisse sedimentologischer Untersuchungen aus dem Nord-Male Atoll (Maledien) In: BIRKENHAUER, J. et. Al (Hrsg.): Beiträge zur Geographie der Meere und Küsten – Vorträge der 9. Jahrestagung in München. *Münchner Geographische Abhandlungen*, Band 13, S. 27 – 42, München.
- SCOFFIN, T.P. (1970) A conglomeratic beachrock in Bimini, Bahamas, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 40 S 756 – 758
- SCOFFIN, T.P. & STODDART, D.R. (1983): Beachrock and intertidal cements. In: GOUDIE, A.S. & PYE, K. (Hrsg.): Chemical sediments and geomorphology: precipitates and residua in the near-surface environment. London.
- SEIM, R. & TISCHENDORF, G. (HRSG.) (1990): Grundlagen der Geochemie. Leipzig.
- SOROKIN, Y.I. (1973): Microbiological aspects of the productivity of coral reefs. In: JONES, O.A. & ENDEAN, R.: *Biology and Geology of coral reefs*. Volume II, S. 17 - 45, London.
- SHEPPARD, C.R.C. (2002): Coral reef coasts. In: SCHWARTZ, M.L. (Hrsg.): *Encyclopedia of coastal Science*; Amsterdam.
- SHORT, A.D. (2002): Carbonate sandy beaches. In: SCHWARTZ, M.L. (Hrsg.): *Encyclopedia of coastal Science*; Amsterdam.
- SPURGEON, D., DAVIS, R.A. & SHINNU, E.A. (2003): Formation of beachrock at Siesta Key, Florida and its influence on barrier island development. *Marine Geology*, Band 200 (1-4), S. 19 – 29.

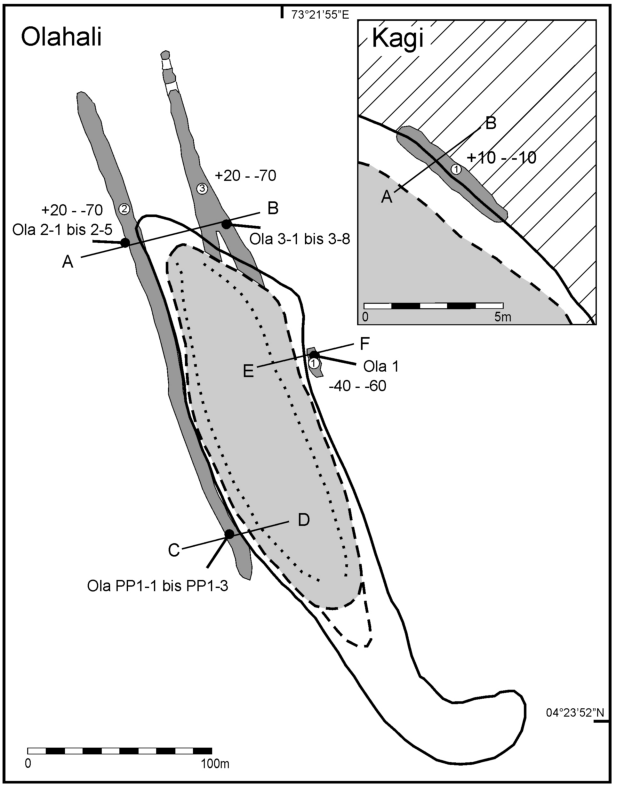
- STEERS, J.A. & STODDART, D.R. (1977): The origin of fringing reefs, barrier reefs and atolls. in: JONES, O.A. & ENDEAN, R.(Hrsg.): *Biology and Geology of coral reefs*. Volume IV, S. 21 - 54, London.
- STEINKE, S., KIENAST, M. & HANEBUTH, T. (2003): On the significance of sea level variations and shelf paleo-morphology in governing sedimentation in the southern South China Sea during the last deglaciation. *Marine Geology*, Band 201 (1-3), S. 179 – 206.
- STEINMETZ, M. (1994): Sedimentologische Untersuchungen an ausgewählten Faros im Nord-Male Atoll (Malediven) unter Bezugnahme auf Probleme der anthropogenen Nutzung. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Christian–Albrechts–Universität zu Kiel.
- STIRLING, C.H., ESAT, T.M., LAMBECK, K. & MCCULLOCH, M.T. (1998): Timing and duration of the last interglacial: evidence for a restricted interval of widespread coral reef growth. *Earth and Planetary Science Letters*, Band 160 (3-4), S. 745 – 762.
- STODDART, D.R. & CANN, J.R. (1965): Nature and origin of beachrock. *Journal of Sedimentary Petrology* Vol. 54, S. 243 – 247
- STODDART, D.R. (1971): Coral reefs and islands in catastrophic storms. In: STEER, J.A.: *Applied coastal geomorphology*, S. 155 - 198 London.
- STODDART, D.R. (1971): Rainfall on Indian Ocean coral islands. *Atoll Research Bulletin*, Nr. 147; S. 1 – 20.
- STODDART, D.R. (1973): Coral reefs of the Indian Ocean. In: JONES, O. A. & ENDEAN, R. (Hrsg.): *Biology and Geology of coral reefs*. Volume I, S. 51 - 91, London.
- STODDART, D.R. & STEERS, J.A. (1977): The nature and origin of coral reef islands. In: JONES, O. A. & ENDEAN, R.: *Biology and Geology of coral reefs*. Volume IV, S. 60 - 103, London.
- STODDART, D.R. (1990): Coral reefs and islands and predicted sea level rise. In: ARNOLD, E. (Hrsg.): *Progress in Physical Geography*, Band 14, Nr. 1, S. 521 – 536.
- STRASSER, A., DAVAUD, E. & JEDOUI, Y. (1989): Carbonate cements in Holocene beachrock: example from Bahiret el Biban, southeastern Tunisia. *Sedimentary Geology*, Band 62, S. 89 – 100.
- TAYLOR, J.C. & ILLING, L.V. (1969): Holocene intertidal calcium carbonate cementation, Qatar, Persian Gulf; *Sedimentology* Vol. 12, S. 69-107
- TIETZ, G. & MÜLLER, G. (1971): High-magnesian calcite and aragonite cementation in recent beachrocks, Fuerteventura, Canary Islands, Spain. In: BRICKER, O.P. (HRSG): *Carbonate cements. Studies in Geology*, Band 19, S. 4-5; John Hopkins University, Baltimore.
- TUCKER, M.E. & WRIGHT, P.V. (1990): *Carbonate Sedimentology*. Oxford
- TURNER, R.J. (2002): Beachrock. In: SCHWARTZ, M.L. (Hrsg.): *Encyclopedia of coastal Science*; Amsterdam.
- TURNER, R.J. (2003): Investigations on ridge and runnel topography and its influence on beach morphodynamics. Internet Report
- TÖPFER, E. (2000): Malediven – Bevölkerung, Kultur und Gesellschaft; In: *Südasien-Informationsnetz e.V.*; Internetreport

- UNITED KINGDOM HYDROGRAPHIC OFFICE (HRSG.) (2005): Admiralty tide tables 2006 – Indian Ocean and South China Sea, Volume 3, Taunton, Somerset
- UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR ASIA AND THE PACIFIC (HRSG.) (2003): Maldives. Internet-Report (ohne nähere Literaturangabe)
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMM (HRSG.) (2002): State of the environment – Maldives 2002. Thailand
- VAZ, G.G. & BANERJEE, P.K. (1997): Middle and late Holocene sea level changes in and around Pulicat Lagoon, Bay of Bengal, India. *Marine Geology*, Band 138 (3-4), S. 261 – 271.
- VITAL, H. & STATTEGGER, K. (2000): Lowermost Amazon River: evidence of late quaternary sea level fluctuations in a complex hydrodynamic system. *Quaternary International*, Band 72 (1), S. 53 – 60.
- VOLLBRECHT, R. & MEISCHNER, D. (1993): Sea level and diagenesis: a case study on Pleistocene beaches, Bermuda. *Geologische Rundschau*, Nr. 82, S. 248-262
- WARRICK, R.A. (1993): Climate and sea level changes: a synthesis. In: WARRICK, R.A., BARROW, E.M. & WIGLEY, T.M.L. (HRSG.): Climate and sea level change: observations, projections and implications. S. 3 – 24. Cambridge.
- WATSON, R.T., ZINYOWERA, M.C. & MOSS, R.H. (1997): The regional impacts of climatic change – an assessment of vulnerability. IPCC Special Report. New York.
- WEBB, G.E., JELL, J.S. & BAKER, J.C. (1999): Cryptic intertidal microbialities in beachrock, Heroin Island, Great Barrier Reef: implications for the origin of microcrystalline beachrock cement. *Sedimentary Geology*, Band 126 (1-4), S. 317 – 334.
- WEISE, C. (1998): Calcit: Das formenreichste Mineral der Erde. *extraLapis*, Band 14, München.
- WHITTLE, G.L., KENDALL, C.G.S.C., DILL, R. & ROUCHE, L. (1993): Carbonate cement fabrics displayed: A traverse across the margin of the Bahamas platform near Lee Stocking Island in the Exuma Cays. *Marine Geology*, Band 110 (3-4), S. 213 – 243.
- WINTERHOLLER, A. J. (1994): Charakteristika und Niveaus der Beachrock-Vorkommen auf Inseln des Nord-Malé Atolls (Malediven) In: KLUG, H. & KLUG, G. (Hrsg.): Meere und Küsten im Spiegel neuer geographischer Forschungsergebnisse. Berichte des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste der Universität Kiel, Band 6, S. 165 - 175, Büsum.
- WOODROFFE, C.D. (2002): Coasts: form, process and evolution. Cambridge.
- WOODROFFE, C.D., MCLEAN, R.F., SMITHERS, S.G. & LAWSON, E.M. (1999): Atoll reefs. Proc. of the Seventh International Coral Reef Symp., S. 1217 – 1226; Guam.
- WOODROFFE, C.D., (1992): Morphology and evolution of reef islands in the Maldives. island formation and response to sea-level change: west Island, Cocos (Keeling) Islands. *Marine Geology*, Band 160, S. 85 – 104
- WOODROFFE, C.D., (1989): Maldives and Sea Level Rise: An environmental perspective. Report on a visit to the Republic of the Maldives. Wollongong/Australien. Unveröffentlichter Report an das Marine Research Center, Ministry of Fisheries and Agriculture; Male.
- WOODROFFE, C.D., MCLEAN, R.F., POLACH, H. & WALLENSKY, E. (1990): Sea level and coral atolls: Late Holocene emergence in the Indian Ocean. *Geology*, Vol. 18; S. 62-66.

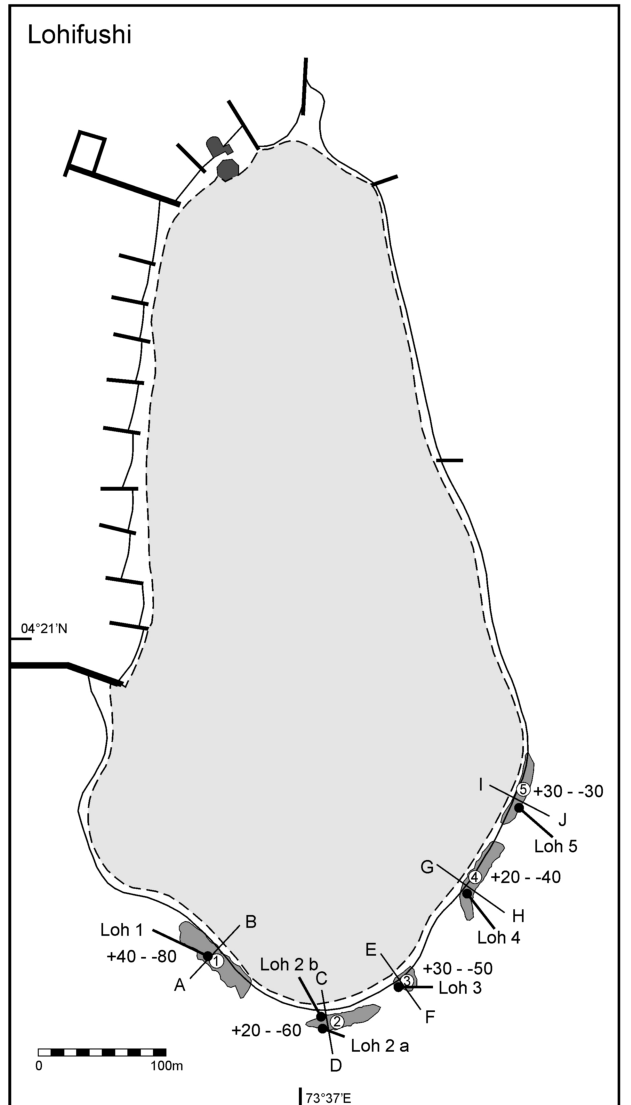
- WOODROFFE, C.D., MC LEAN, R.F., POLLAH, H., VEH, H.H. & WALLENSKY, E. (1988): Pleistocene and Holocene reefal limestones, Cocos Islands, Indian Ocean. *Proc. of the Sixth International Coral Reef Symp.*, S. 562 – 581.
- WOODWORTH, P.L. (1993): Sea level changes. IN: WARRICK, R.A., BARROW, E.M. & WIGLEY, T.M.L. (HRSG.): *Climate and sea level change: observations, projections and implications*. S. 379 – 391. Cambridge.
- WIGLEY, T.M.L. (HRSG.): *Climate and sea level change: observations, projections and implications*. S. 379 – 391. Cambridge.
- ZONG, Y. (2004): Mid-holocene sea level highstand along the southeast coast of China. *Quaternary International*, Band 117, S. 55 - 67.

Karten und Lageskizzen der Beachrockfundorte

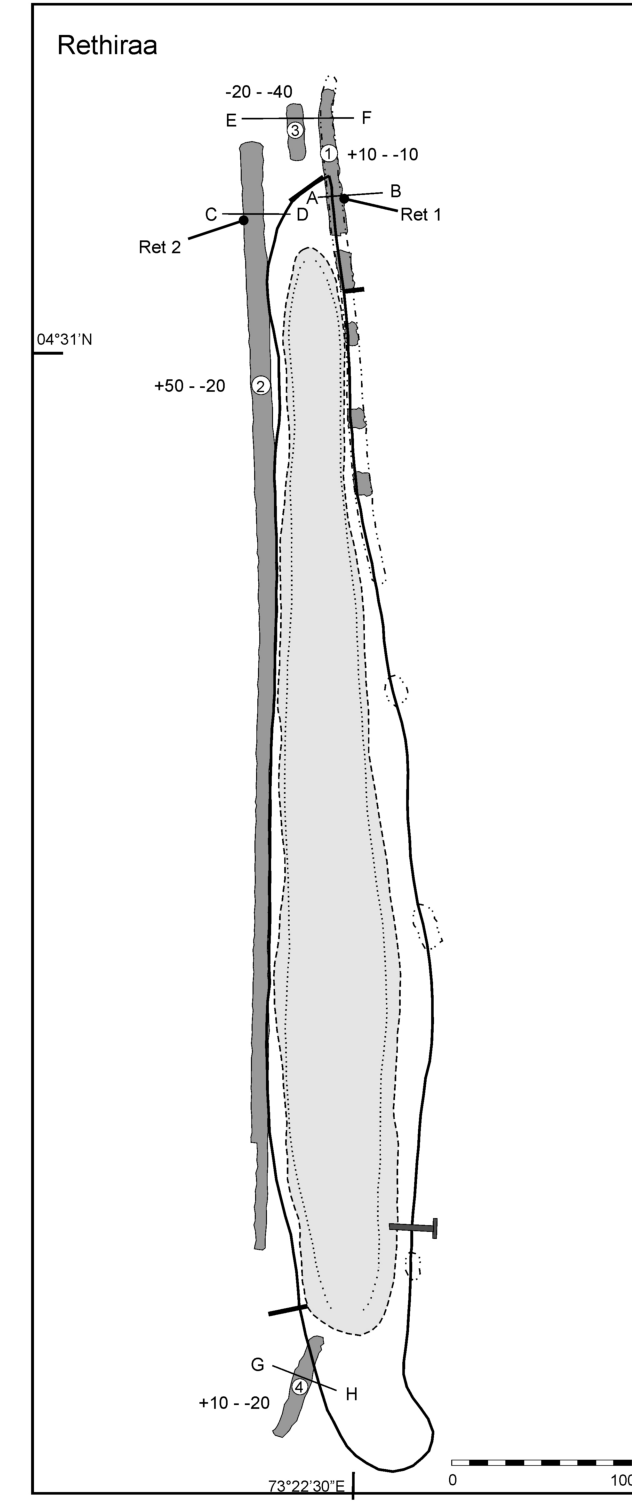
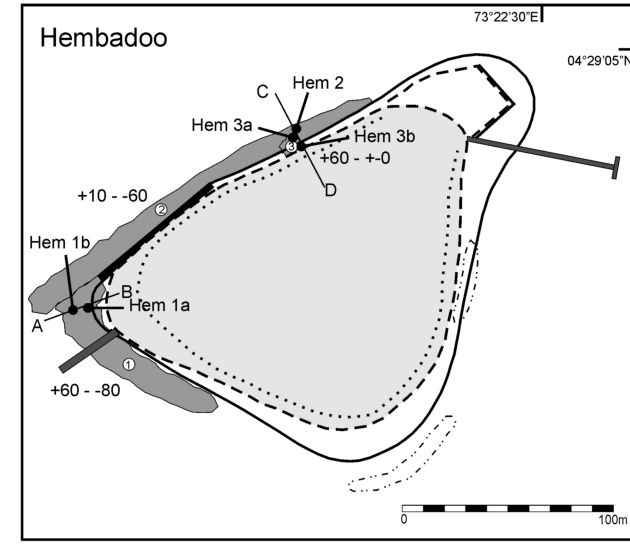
Testgebiet Nord



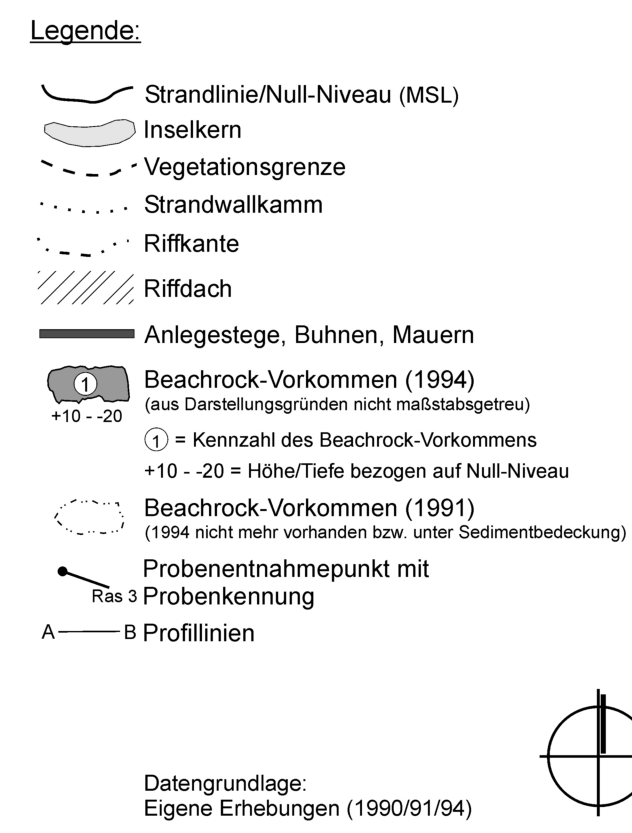
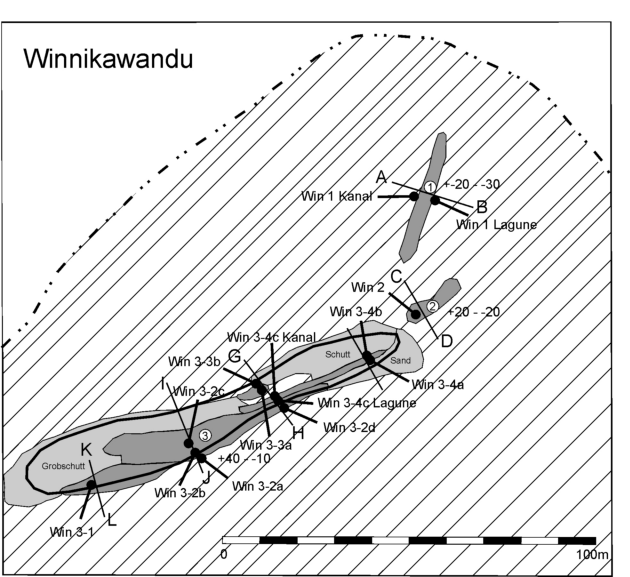
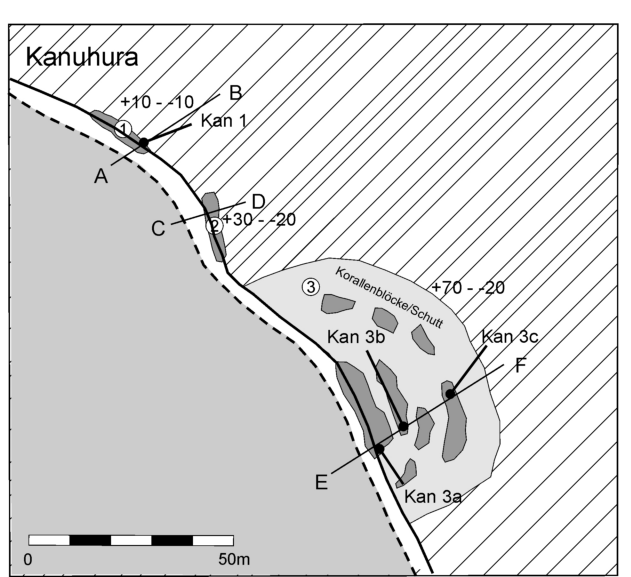
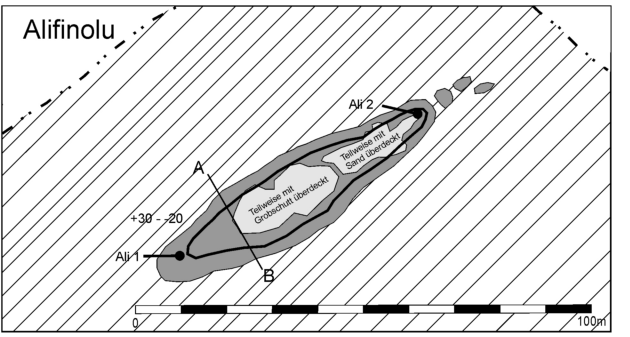
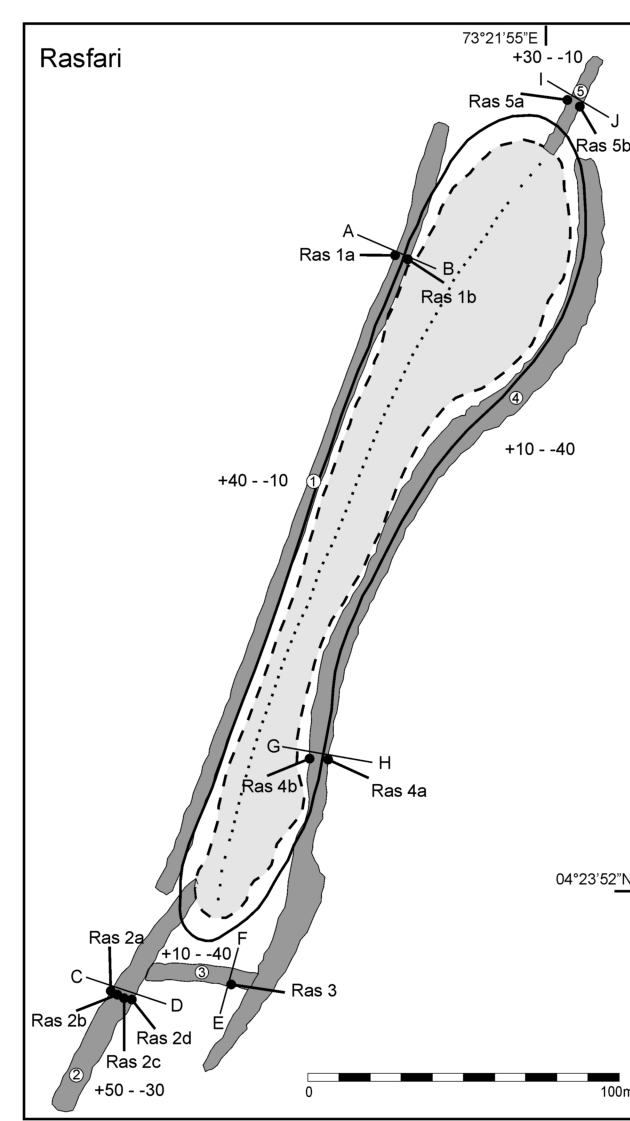
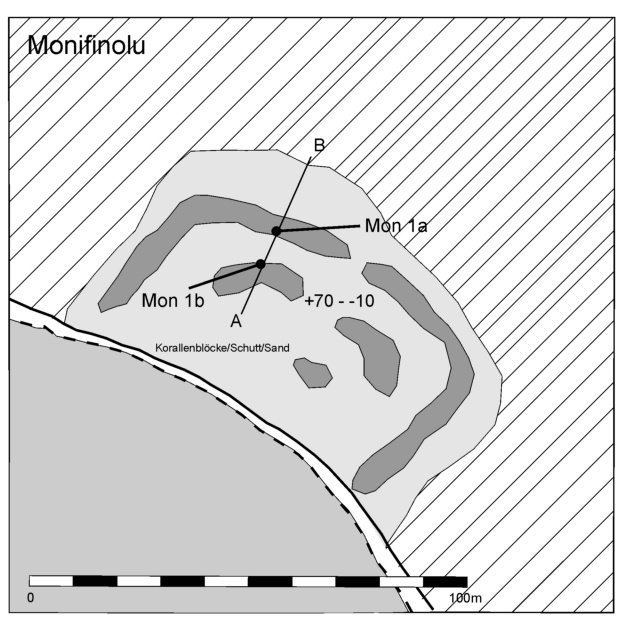
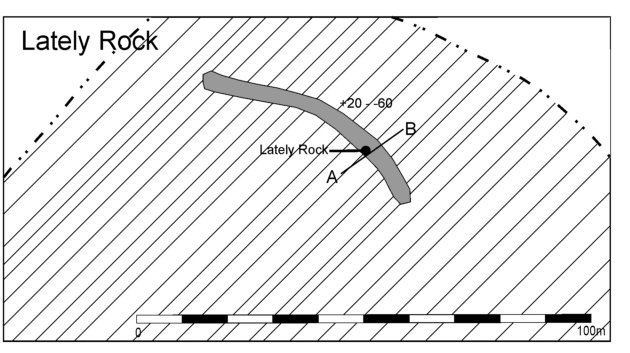
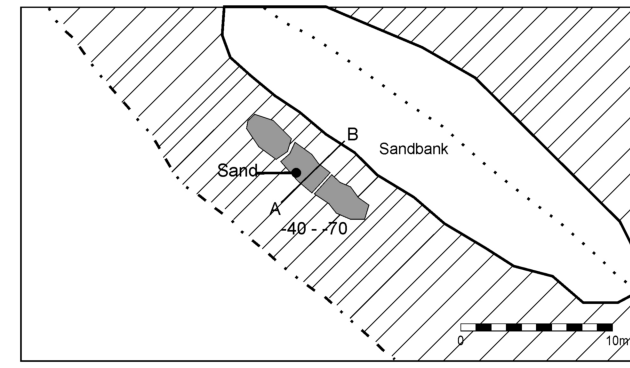
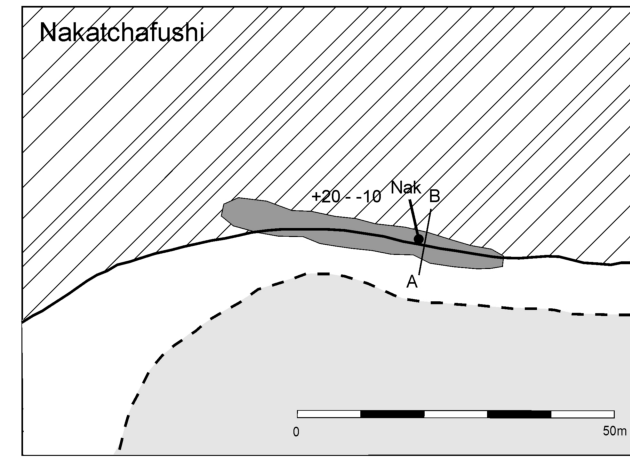
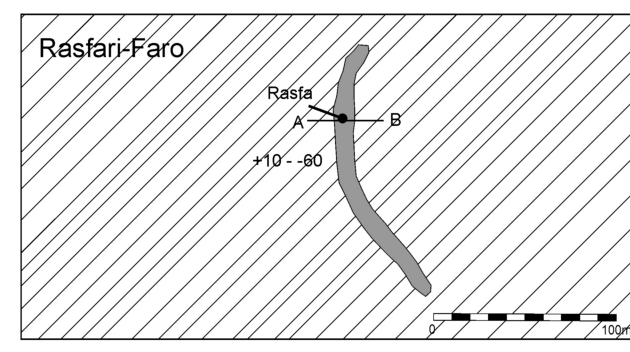
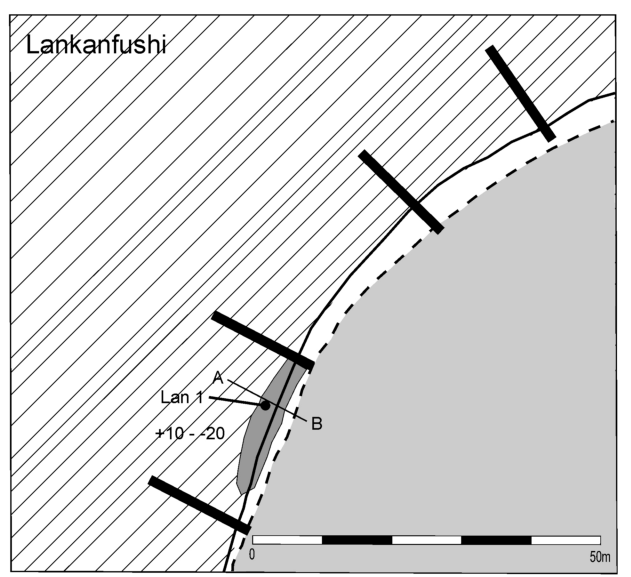
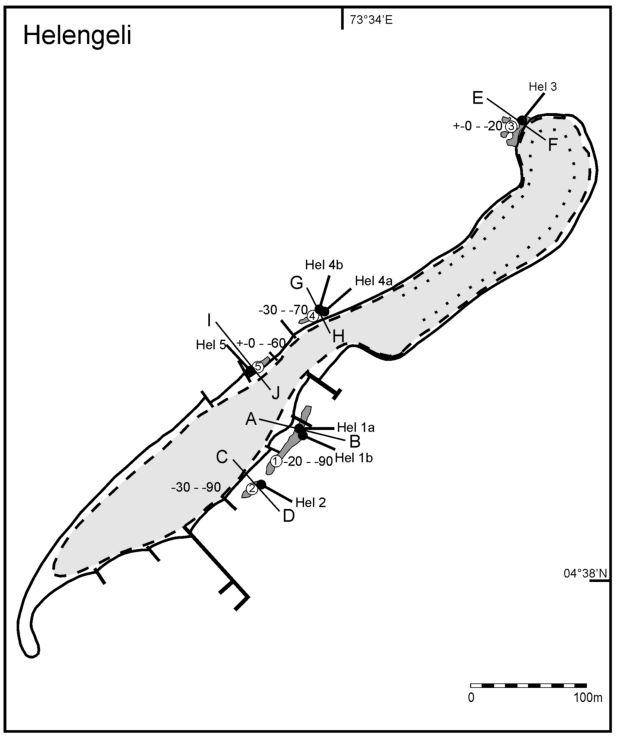
Testgebiet Süd-Ost



Testgebiet West



Testgebiet Nord-Ost



Datengrundlage:
Eigene Erhebungen (1990/91/94)