

# Porta Praetoria

## Teil A: Auswertung der Plan- und Bildunterlagen

### 1 Spurensuche – Geschichtlicher Abriss und das heutige Bild der porta praetoria

#### *Vorbemerkung*

Es gibt gute Gründe, die den Aufwand für eine umfassende Konservierung der römischen porta praetoria in Regensburg rechtfertigen. An erster Stelle steht ohne Zweifel die baugeschichtliche und denkmalpflegerische Bedeutung der Toranlage, für die es in Deutschland – mit Ausnahme der porta nigra in Trier – kein vergleichbares Beispiel gibt. Der Unikatcharakter des Bauwerks alleine verpflichtet zu einem respektvollen Umgang mit der im Fachjargon etwas spröde so genannten „originalen Denkmalsubstanz“ – selbst wenn es sich um eine auf den ersten Blick schmucklose Militäranlage aus rechteckigem Quadermauerwerk handelt.

Ein zweiter Grund ist die akute Gefährdung der nur bei oberflächlicher Betrachtung solide und unverwüstlich erscheinenden Kalksteine. 1800 Jahre Standzeit und eine wechselvolle Geschichte haben ihre Spuren auf und in dem Gestein hinterlassen und zu einem statisch labilen und substanzuell höchst bedenklichen Zustand geführt.

Dass die porta praetoria überhaupt noch als begehbares Tor in der Stadtlandschaft von Regensburg präsent ist, ist dem Engagement des Historischen Vereins der Oberpfalz und Regensburg zu verdanken, der am Ende des 19. Jahrhunderts die Aufmerksamkeit auf die römischen Reste lenkte, die bis zu jenem Zeitpunkt im Gebäudekomplex des Bischöflichen Brauhauses verschwunden waren und keine besondere Wertschätzung genossen.<sup>1</sup> Denn von der Ehrfurcht gebietenden Wehranlage mit halbrund vorspringenden 8 m hohen Tortürmen in einem Befestigungsring aus 2,5 m starken und etwa 10 m hohen Quadermauern, bewehrt mit vier Eck- und 18 Zwischentürmen, umgrenzt von einem umlaufendem 3 m tiefen Spitzgraben, sind aufgrund der drastischen Eingriffe über die Jahrhunderte hinweg nur spärliche Fragmente erhalten geblieben.<sup>2</sup> Die unter Marc Aurel errichtete Castra Regina war jedoch so imposant ausgelegt, dass selbst noch die Reste des Nordtores zu einem Wahrzeichen der Stadt geworden sind, das die zahlreichen Besucher stets wieder in seinen Bann zieht.

<sup>1</sup> Rainer Brunner, Die Kontroverse um die Gestaltung der 1885 wieder entdeckten Porta Praetoria in Regensburg. VHVO 140, 2000, 7 ff.

<sup>2</sup> Zum Überblick vgl. K. Dietz u. Th. Fischer, Die Römer in Regensburg (Regensburg 1996) bes. 89 ff.

## *Das römische Erbe in einer wachsenden Metropole*

Lässt man die Geschichte des Legionslagers Revue passieren, so ist die Tatsache gesichert, dass nach der Erbauung um 179 n. Chr. und dem Abzug der Römer Ende des 4. bzw. Anfang des 5. Jahrhunderts der Befestigungsring bis in das hohe Mittelalter hinein bestehen blieb. Er muss noch für die als „Metropolis“ beschriebene urbs *radaspona* der Agilofinger und Bajuwaren als funktionstüchtiges Bollwerk gedient haben, das die aus Quadern errichtete, mit hochragenden Türmen und vielen Brunnen bestückte Stadt zu schützen vermochte.<sup>3</sup> Vermutlich setzte mit Karl dem Großen und den Karolingern nach 788 eine teilweise Neuverwendung und Umnutzung der Römermauer ein. Nach der Überlieferung soll sie bereits für die Neubauten der Pfalz von Ludwig dem Deutschen (um 804 bis 876) als quasi innerstädtischer Steinbruch gedient haben.<sup>4</sup> Zum Abbruch der westlichen Umgrenzungsmauer ist es unter Herzog Arnulf von Bayern († 937) gekommen. Er befestigte um 920 die Stadt der Kaufleute, die *civitas nova*, und sicherte die erste nachrömische Stadterweiterung nördlich der Alpen mit einem Mauerring bis zur Donau.<sup>5</sup> Welche Rolle die römischen Doppelportale innerhalb des Mauerrings spielten, ist ungewiss.

Für das Jahr 932 ist jedenfalls die Nennung einer *porta aquarum* (Wassertor)<sup>6</sup> überliefert, die einen unmittelbaren Zugang zur Donau nahe legt und Hinweise auf die weitere Nutzung des Tores als verbindendes Glied von der Wasserstraße zur Innenstadt gibt. Mit der Erweiterung des Domes nach Westen und der dadurch bedingten Aufgabe der *via praetoria* im 11. Jahrhundert muss es zu einer Veränderung des Wegenetzes innerhalb der Befestigung gekommen sein.<sup>7</sup> Gegen Ende des 13. Jahrhunderts erhielten die anwachsenden Vorstädte entlang der Donau schließlich einen neuen Mauerring<sup>8</sup>, der bis zum Anfang des 14. Jahrhunderts vollständig

<sup>3</sup> Aus der Zeit um 770: *Arbeonis episcopi Frisingensis Vitae sanctorum Haimhammi et Corbiniani*, hrsg. von B. Krusch, in: *Monumenta Germaniae Historica [MGH] Scriptores Rer. Germ.* XIII (1920) 32.

<sup>4</sup> Notker der Stammler, *Taten Kaiser Karls des Großen*, hrsg. von H. F. Haefele, *MGH Scriptores Rer. Germ.* NS XII (1962) 68 f.

<sup>5</sup> Vgl. *Ex Arnoldi libris de S. Emmeramo*, hrsg. von G. Waitz, in: *MGH Scriptores Rer. Germ.* IV (1841) 552.

<sup>6</sup> Eine Schriftquelle im Zusammenhang mit einer Regensburger Synode von 932 nennt „... in ecclesia sancti Petri apostolorum principis, quae mater ecclesiarum Regiae civitatis iuxta portam aquarum antiquitus excreverat ...“ Vgl. *Die Konzilien Deutschlands und Reichsitaliens 916–1001*, Teil 1. In: *MGH, Concilia*, hrsg. von E.-D. Hehl (München 1987) 93 ff., bes. 96 mit Anm. 19. – Vgl. auch C. T. Gemeiner, *Regensburgische Chronik I* (1800, Nachdruck München 1987) 110. Gemeiner, dem die wissenschaftliche Erschließung dieser (bis in die neueste Literatur zumeist ohne Nachweis verwendete) Quelle zu verdanken ist, lokalisierte allerdings die *porta aquarum* noch im (mittelalterlichen) Kränchertor (s. u.), zumal ihm die Existenz der römischen *porta praetoria* nicht bekannt sein konnte. Die Übereinstimmung von *porta praetoria* und *porta aquarum* scheint aber zweifelsfrei, da im 10. Jahrhundert in diesem Areal noch die römische Befestigung genutzt wird. Dies bedeutet, dass lediglich ein einziges Tor in der Nähe der Domkirche St. Petrus mit Bezug zum Wasser bzw. zur Donau existierte, nämlich die *porta praetoria*.

<sup>7</sup> A. Hubel, M. Schuller, *Der Dom zu Regensburg* (Regensburg 1995) 7; 8 Abb. 2.

<sup>8</sup> A. Hubel, *Gotik in Regensburg. Stadtopographie und städtebauliche Entwicklung vom 13. bis zum frühen 16. Jahrhundert*. In: *Geschichte der Stadt Regensburg 2* (Regensburg 2000) 1124 ff.

ausgebaut und mit fünf Toren versehen wurde (Abb. 1). Zu jenem Zeitpunkt kann die römische Wehranlage (mit Ausnahme ihrer Süd- und Südostflanke, die teils in die mittelalterliche Befestigung integriert wurde) keinem Verteidigungszweck mehr gedient haben. Die porta aquarum bzw. porta praetoria wurde durch die nach Norden bis zum Donauufer vorgeschobene Stadtmauer in ihrer Funktion als Tor bedeutungslos und durch das Tor im Brückturm der Steinernen Brücke (vor 1307)<sup>9</sup> und das östlich benachbarte Kränchtort<sup>10</sup> abgelöst (Abb. 2).

Eine Voraussetzung für den Fortbestand und die Erhaltung der Toranlage bis in unsere Tage ist die Einbindung des Gebäudes in den wachsenden Komplex des Bischofshofes. Die Wehranlage wurde wohl aufgrund ihrer schieren Größe und dem repräsentativen Charakter frühzeitig in die Residenz des Bischofs integriert.<sup>11</sup> Man vermutet, dass das Gelände zwischen dem Vorgängerbau der Palastkapelle St. Stephan einschließlich der porta praetoria bereits zu karolingischer Zeit ausgebaut war, in Nachfolge zur tradierten frühmittelalterlichen agilofingischen Herzogspfalz, die wohl im Bereich Alter Kornmarkt zu suchen ist.<sup>12</sup> Ob aber das Fehlen des Westturmes mit einer Zerstörung durch feindliche Einwirkung noch während der Römerzeit, mit dem frühmittelalterlichen Umbau des Bischofshofes oder mit strategischen Überlegungen im hohen Mittelalter in Zusammenhang steht, wird nicht mehr zu ergründen sein. Gesichert ist lediglich, dass der Bischofshof nach dem Stadtbrand im Jahr 1273 neu errichtet wurde<sup>13</sup> und im 17. Jahrhundert nur mehr der noch heute sichtbare Ostturm der römischen Doppelturmanlage existierte (Abb. 3).

Die Geschichte vom Mittelalter bis zur Neuzeit hat die Oberflächen des Quadermauerwerks nachdrücklich gezeichnet. Spuren der Nutzung und Veränderung bezeugen die historische Ausnahmestellung des Bauwerks und stellen dessen Authentizität nachhaltig unter Beweis. Eine Rekonstruktion der Veränderungen und deren zeitlicher Abfolge fällt aber nicht leicht. Es ist weder überliefert, in welchem Umfang die Toranlage zur Römerzeit durch die wiederholten Angriffe der Germanen zerstört wurde, noch wann man Baumaßnahmen zu einer ersten Umnutzung des Gebäudes ergriff. Unwahrscheinlich ist eine vollständige Zerstörung des Gebäudes und der Wiederaufbau unter Verwendung von Spolien, wie er für die porta principalis dextra vermutet wird.<sup>14</sup> Der aktuelle Kenntnisstand zur Nutzungs- und Veränderungsgeschichte ist erst seit kurzer Zeit zusammengestellt.<sup>15</sup>

<sup>9</sup> Zu den Brücktürmen vgl. L.-M. Dallmeier/G. Meixner, Der nördliche Brückenkopf der Steinernen Brücke im Spiegel der jüngsten archäologischen Ausgrabungen, Denkmalpflege in Regensburg, Bd. 9 (Regensburg 2004) 22–53.

<sup>10</sup> Vgl. C. Obermeier, Die erste Regensburger Bauamtschronik. Edition und Kommentar. Masch. Magisterarbeit Universität Regensburg (1987) 60 Nr. 134 mit Anm. 194.

<sup>11</sup> Zur ersten Bischofspfalz und verschiedenen Lokalisierungsansätzen vgl. E. Frauenknecht, Der Bischof und die Stadt. Ein Spannungsverhältnis zwischen geistlicher Intensität und weltlicher Aktivität. In: Geschichte der Stadt Regensburg 2 (Regensburg 2000) 691 f.

<sup>12</sup> P. Schmid, Ratispona metropolis Baioariae. Die bayerischen Herzöge und Regensburg. In: Geschichte der Stadt Regensburg 1 (2000) 51 ff. – S. Codreanu-Windauer, M. Hoernes, A. Rettnner, K. Schnieringer u. E. Wintergerst, Die städtebauliche Entwicklung Regensburgs von der Spätantike bis ins Hochmittelalter. Ebd. 2 (2000) 1013 ff. mit Abb. S. 1020.

<sup>13</sup> Vgl. C. T. Gemeiner (Anm. 6) I, 402 f. mit Quellenangabe.

<sup>14</sup> Zur porta principalis dextra vgl. L.-M. Dallmeier, Fundort Regensburg. Archäologische Topographie der Stadt Regensburg. Vorgeschichte, römische Kaiserzeit und frühes Mittelalter innerhalb der zweiten Stadterweiterung (Regensburg 2000) 178 f. Nr. 204 mit weiterer Lit.

<sup>15</sup> Thomas Aumüller, Die Porta Praetoria und die Befestigung des Legionslagers in Regensburg. Dissertation TU München (maschinengeschriebenes Manuskript 2002).

## *Die Zeichen der Vergangenheit*

Bei der Spurensuche am Bau fällt der Blick häufig auf informative wie gleichermaßen beunruhigende Details. So gibt es untrügliche Zeichen von Brandeinwirkung, die sowohl auf eine Feuersbrunst vor den Mauern als auch im Turminnen hinweisen. Das Gestein auf der Ost- und Nordseite ist schwer geschädigt; ebenso sind die Innenseiten der Rundbogenfenster im Obergeschoss durch thermische Einwirkung tiefrot verfärbt. Das Ausmaß der Brandschäden, das sich in der Umwandlung gelber Eisenoxide in roten Hämatit, in Abplatzungen und einer millimetertief in das Gefüge hineinreichenden Zersetzung des Gesteins am Torbogen und der Nordseite dokumentiert, ist ein untrügliches Indiz für eine äußerst heftige Brandentwicklung. Leider sind – abgesehen von dem genannten Stadtbrand von 1273 – keine Quellen überliefert, die eine Datierung der Brände zulassen.

Als Folge der Brände, des Raubbaus an wertvollen Kalksteinquadern und des Auseinanderbrechens der Mauerschale hat sich eine für die Erhaltung des Bauwerks höchst ungünstige Gesamtkonstellation ergeben. Warnsignale einer akuten Gefährdung des Bestandes sind eine Vielzahl chaotisch verlaufender Risse in 60% der 240 Werksteinquader. Hinzu kommen Spannungsrisse, die über Horizontalfugen hinweg verlaufen, das Abdriften der Turmwände und deren Kippbewegung nach Norden. Die Schiefstellung an sich ist alarmierend und entspricht einer Neigung aus der Vertikalen um etwa 7°.

Weder die Rissbildungen noch die Neigung des „schiefen Turmes“ sind stabile Zustände und eher mit dynamischen Gleichgewichten zu beschreiben. Die Stabilität des vermutlich bereits im Mittelalter durch Eisenanker gesicherten Mauerwerks wird in der Zukunft wesentlich vom Verkehrsaufkommen und den Erschütterungen im Umfeld bestimmt werden. Ob die von Rissen durchzogene Mauerschale die Verkehrssicherheit in der Umgebung des Bauwerks unmittelbar zu beeinträchtigen vermag, bleibt zu klären. Indizien für ein akutes Fortschreiten der Rissentwicklung sind zumindest an der Nordseite anhand überputzter, heute aber offener Vertikalrisse gegeben.

## 2 Anmerkungen zur Bearbeitung der Archivalien und des Bildmaterials<sup>16</sup>

Innerhalb dieses Projektes wurde das bis Mitte des Jahres 2001 zugängliche Bildmaterial über die römische Toranlage gesichtet und sortiert. Der Bestand gliedert sich in Fotografien, Planunterlagen, künstlerische Darstellungen und Postkarten.

Über den größten Bestand an Fotografien verfügt die Städtische Lichtbildstelle (Stadt Regensburg, Presse und Informationsstelle – Bilddokumentation), wo sich über 120 Abbildungen befinden, die seit der Freilegung nach 1885 aufgenommen wurden. Bei diesem Bestand handelt es sich zum großen Teil um Schwarzweißaufnahmen. Hinzu kommen etwa 100 ausgesuchte Bilder der Außenstelle des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege in Regensburg, die sich auf Restaurierungsarbeiten seit den 1950er Jahren beziehen. Der enorme Bestand an Fotos der Außenstelle des Landesamtes ist nicht eingearbeitet worden, da bei über 100 weite-

<sup>16</sup> Im Anhang zu diesem Kapitel ist eine tabellarische Zusammenstellung des ausgewerteten Archiv- und Bildmaterials enthalten.

ren Bildern keine Negative vorliegen und die Einzelaufnahmen keine Signaturen besitzen. Weitere Abbildungen stammen aus dem Stadtarchiv und der Stadtregistratur in Regensburg sowie aus dem Luftbildarchiv (Katasterpläne). Insgesamt wurden 220 Fotografien im Rahmen der Archivauswertung erfasst und katalogisiert.

Ein Konvolut an verschiedenen Abbildungen – Zeichnungen nach Fotografien, künstlerische Darstellungen, etc. – gehört zum Bestand des Historischen Vereins der Oberpfalz und Regensburg und wird in der Bibliothek des Hauses Thurn und Taxis in Regensburg aufbewahrt. Illustrationen auf Bierdeckeln und Postkarten der Jahrhundertwende und diverse Zeitungsausschnitte sowie Werbeträger belegen, wie schnell sich die Stadt mit der porta praetoria identifizierte. In der Zusammenstellung wurden 16 Darstellungen erfasst.

Ergänzt werden diese Abbildungen durch Planunterlagen aus dem Archiv der Stadt Regensburg und der Registratur des Bauamtes. Die Pläne zeigen Umbauphasen des 19. und 20. Jahrhunderts, die das angrenzende Sudhaus und die Portalanlage betreffen. Enthalten sind:

- a) Planunterlagen des Sudhauses über die Einbauten von Kesselanlagen in den Jahren nach 1860 (Maßstab 1:100 und 1:50),
- b) Pläne über die Instandsetzung des Bauwerks um 1887 (das Vorhaben kam nicht zur Ausführung),
- c) Darstellungen aus dem 19. Jahrhundert mit den baulichen Anlagen des Sudhauses,
- d) Umbaupläne aus den 1970er Jahren, die den Einbau des sogenannten Römerappartements im Bischofshof dokumentieren.

Die Stadtansichten in Halbvogelschau von Bahre und Merian, die zu den Beständen des Stadtmuseums Regensburg gehören, ergänzen die Liste. Beide Pläne werden als Ausschnittabbildungen des Gebietes um den Bischofshof in die Sammlung einbezogen. Abgerundet wird die Sammlung historischer Planzeichnungen durch Katasterpläne aus der Zeit von 1808 bis in die jüngste Vergangenheit.

Aktuelle Planunterlagen aus neuerer Zeit sind eine fotogrammetrische Abwicklung aus dem Jahr 1966 und ein in den Jahren 1998–2002 erstelltes, verformungsgerechtes Aufmaß der Portalanlage. Das Handaufmaß ist Teil der Dissertation von Thomas Aumüller zur Baugeschichte der porta praetoria, die er im Jahr 2002 an der Technischen Universität München vorgelegt hat. Das Planmaterial wurde den Teilnehmern des Projektes dankenswerterweise für die kartographische Erfassung am Objekt zur Verfügung gestellt und bildete die Grundlage der projektbezogenen Kartierungen.

Das Bildmaterial ist hinsichtlich seines Inhaltes ausgewertet und katalogisiert worden. Insgesamt, umfasst die Abteilung „Fotografien“ 31 Gruppen, die formal auf zwei Obergruppen aufgeteilt wurden und die Zeiträume von 1888–1950 und 1950–2000 thematisieren. Auf die Sammlung „bis 1950“ entfallen alleine 19 Untergruppen und zahlreiche Einzeldatierungen, wobei hier die größere Anzahl an nicht datierbaren oder falsch datierten Bildern zu finden ist. Häufig sind die Abbildungen nachträglich eingeordnet und gehören in die Jahre um 1900 und die Zeit nach 1930. Die Gruppe „ab 1950“ lässt sich in 12 weitere Gruppen aufteilen, bei denen es sich meist um einzelne Festdatierungen handelt.

Inhaltlich waren die Fotografien aus der Zeit von 1900 bis in die 1960er Jahre für die konservierungstechnischen Aspekte des Projektes von besonderem Interesse.

Sie wurden im Hinblick auf die Interpretation der Verwitterungs- und Schadensprozesse des Kalksteinmauerwerks ausgewertet. Die meisten Fotografien aus dieser Zeit sind jedoch nicht oder falsch datiert. Aus diesem Grund wurden etwa 200 Fotografien verglichen und in eine erste zeitliche Abfolge gesetzt. Probleme bereiteten die Ausbesserungen und Restaurierungen bis zum Zweiten Weltkrieg und in den ersten Jahren danach, über die keine schriftlichen Belege vorliegen. Zur Klärung der Restaurierungsgeschichte lag deshalb das Hauptaugenmerk auf der Bildauswertung hinsichtlich der Veränderungen an der Fassade des Bischofshofes und des Umfeldes. Um innerhalb einer Phase bis zur nächsten datierten Instandsetzung eine zeitliche Einordnung treffen zu können, wurden Kriterien wie Feuchtehorizonte, Fehlstellen an Dachrinnen, Putzschäden, die Anhebung des Gehwegs vor dem Torbogen oder der Bau der Gartenmauer an der Ostseite herangezogen.

Das Ergebnis der Auswertung wurde in Form eines zeitlich strukturierten Kataloges zusammengestellt, der im Anhang zu diesem Kapitel enthalten ist. Sämtliche im Rahmen des Projektes erstellten Dokumentationen, Fotografien und fotografischen Abwicklungen der Innen- und Außenmauern werden dem Archivbestand ebenso wie das verformungsgetreue Aufmaß von Thomas Aumüller und die dreidimensionale Erfassung des Gebäudes hinzugefügt. Man darf hoffen, dass der Gesamtbestand des gesammelten Materials im Jahr 2004 in adäquater Form digital gespeichert ist. Das digitalisierte Archiv liegt dem Historischen Verein für Oberpfalz und Regensburg vor und ist Teil des Abschlußberichtes des von der Deutschen Stiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes zur Kalksteinkonservierung an der porta praetoria.

### 3 Spurenanalyse – Chronologie und Auswertung des Bildmaterials

Bildarchivalisch ist die Vergangenheit der römischen Anlage bis in das 17. Jahrhundert zurückzuverfolgen, einer Zeit, in der die Römermauer nach den langen Jahren der Nutzung als Bollwerk, der folgenden Umnutzung und den Steinplündereien nur noch als Fragment bestand. Die Lagermauer war nicht nur bedeutungslos geworden – sie war allem Anschein nach vollständig in Vergessenheit geraten. Andererseits hat vielleicht genau dies zum Erhalt der porta praetoria bis zum heutigen Tag beigetragen. Wäre das Römertor nicht im Bischofshof und dem bischöflichen Brauhaus integriert gewesen, würde man heute kaum noch zusammenhängende Mauerreste vorfinden und das wertvolle Baumaterial wäre ebenso entropisch über die Stadt verteilt, wie das der anderen Lagertore.

Natürlich ist die porta praetoria von dem städtischen Treiben in ihrer Umgebung nicht verschont geblieben und war stets eng in die jeweiligen gesellschaftlichen Verhältnisse eingebunden. Die Spuren, die jede Zeit hinterlassen hat, lassen sich dank der archivierten Pläne, Zeichnungen und Fotografien mit einiger Sicherheit zuordnen. Wie sich der römische Bestand änderte und das Umfeld ausgesehen haben mag, soll im Folgenden anhand ausgewählter Beispiele aufgezeigt werden.

#### *Aufschlussreiche Bilddokumente des 17. Jahrhunderts*

In einer auf 1614 datierten, grafischen Malerei von Bahre (Abb. 4) ist die renaissancezeitliche Stadt aus der Vogelperspektive mit Blick von Süden dargestellt. Dass die kirchliche Macht mit dem Dom, dem davor liegenden großen Gräberfeld und

dem Bischofshof entsprechend ihrer Bedeutung breiten Raum einnahm, wird in der Detailfotografie der Zeichnung deutlich. Von Norden, Osten und Süden lehnen sich profane städtebauliche Strukturen an den großen kirchlichen Komplex, westlich grenzt ein freier Platz mit einer Brunnenanlage an. Zwei oder drei Schwibbögen stellen eine Verbindung zwischen den wohl bischöflichen Gebäuden über die Straße hinweg her.<sup>17</sup> Nur zwei sind zweifelsfrei als solche erkennbar. Einer der Bögen ist aufgrund der an dieser Stelle zerstörten Bildoberfläche nur zu erraten. Deutlich ist der westliche Schwibbogen zu identifizieren, der an der Westseite des Ostturmes anschließt. Von dem zweiten Turm fehlt jede Spur. Auch das Doppeltor, das in das Legionärslager führte, ist nicht abgebildet. Andeutungsweise erkennt man nur ein westlich an den Flankenturm angebautes Gebäude mit Erd- und Obergeschoss, das im weiteren als Vor- oder Anbau bezeichnet wird.

Die renaissancezeitlichen Darstellungen des östlichen Flankenturmes der porta praetoria variieren beträchtlich. So ist auf dem wesentlich grafischer und strenger angelegten Stich von Merian, der in das Jahr 1646 datiert<sup>18</sup>, der Bereich „Unter den Schwibbögen“ prägnant und präzise festgehalten. Drei Schwibbögen sind in enger Abfolge zu sehen. Der westliche Schwibbogen ist dem westlichen Bereich des Turms vorgelagert, wie das bereits dem Bahre-Plan zu entnehmen ist. Im Gegensatz zu der älteren Darstellung, wird der Turm (oder umbaute Turm) nicht in runder Form gezeigt: vielmehr besitzt er einen quadratischen Grundriss und einen nördlich gelegenen Eingang, der auf Höhe des Straßenniveaus ansetzt. Ob künstlerische oder grafische Freiheiten bei der Sticherstellung das Halbrund des Turmes in einen Kubus umwandeln, kann nicht gesagt werden. Tatsache ist, dass 1651 in einer Tusche-Federzeichnung aus der Sammlung Schratz<sup>19</sup> wiederum ein Rundturm mit westlich angrenzendem Vorbau gezeigt wird. In Übereinstimmung mit dem Merian-Plan ist auch in dieser Grafik das Gebäude um ein Stockwerk höher als die angrenzenden Anbauten des Bischofshofes.

#### *Bis in das 19. Jahrhundert bleibt die porta praetoria hinter Mauern versteckt*

Dass die erhaltenen römischen Fragmente bis zum Ende des 19. Jahrhunderts eingebaut gewesen sein müssen, geht aus dem Katasterplan von 1808 hervor. Das gesamte Anwesen des Bischofshofes ist ohne Differenzierung als ein Baukörper dargestellt, aus dessen Grundriss sich kein frei stehender Turmbau erschließt. Lediglich die verzeichneten drei Schwibbögen geben einen Hinweis auf die bauliche Abfolge und erinnern an die Lage der porta praetoria (Abb. 5).

Um einiges exakter ist das Stadtbild im Katasterplan von 1812 wiedergegeben (Abb. 6). Der Bischofshof gliedert sich in eindeutig voneinander geschiedene Baukörper, die einen Innenhof umgeben. Im Straßenzug „Unter den Schwibbögen“ ist, östlich an die Flurnummer 118 angrenzend der Umriss des Portals mit dem westlich anschließenden Mauerwerk und die Einbausituation in den Komplex des Bischofshofes zu erkennen. Diese Darstellung ist für beide Katasterpläne aus dem Jahre 1812 stimmig. Bei dem Plan mit der Datierung „1812“ sind jedoch nur zwei Schwibbögen verzeichnet, der dritte scheint zu fehlen: Vermutlich hatte man Zu-

<sup>17</sup> Dehio, G., Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Bayern V: Regensburg und die Oberpfalz, Deutscher Kunstverlag (1991) 613.

<sup>18</sup> siehe Abbildung 2.

<sup>19</sup> siehe Abbildung 3.

geständnisse an die Aufteilung des Schriftzuges „Unter den Schwibbögen“ machen müssen, denn in dem folgenden Plan mit der Datierung „1812a“ aus dem Luftbildarchiv der Stadt Regensburg sind wieder drei Schwibbögen als existierende Bauwerke verzeichnet. Der westliche Schwibbogen wurde erstmals genau lokalisiert: Er stößt in Verlängerung der Turmwestseite auf den vorgelagerten Anbau und könnte zu dem ehemaligen östlichen Torbogen der porta praetoria geführt haben.

Rainer Brunner beschreibt die Situation des Flankenturmes der porta praetoria aufgrund eines Stadtplanes aus diesem Jahr so, dass dieser „sichtbar aus dem Gebäude herausragte“.<sup>20</sup> Möglicherweise ist das freistehende obere Stockwerk gemeint, denn der gesamte Turm kann es nicht gewesen sein. Dies geht aus der im Katasterplan angegebenen, geradlinigen Mauerwerksgrenze des Bischofshofes zur Straße „Unter den Schwibbögen“ hervor und wird durch die Grundrisspläne der Brauerei bestätigt, die anlässlich einer Umbaumaßnahme 1858 eingereicht wurden. Der „*Bauplan über die Einbauung eines Schenkbierekkers unter das Bräuhaus und verlegen des Gährkellers in das Bischöfliche Bräuhaus in Regensburg*“, erstellt am 27. Juni 1858 von „Mayer, Mauermeister“, „Planverfassender Architekt“, zeigt in farbiger Tusche Grundrisszeichnungen und Schnitte durch das Bräuhaus sowie einen Situationsplan, die belegen, dass das Portal zu diesem Zeitpunkt vollständig in das Bräuhaus eingebaut gewesen sein muss (Abb. 7). Die Brauerei gehörte zu dieser Zeit bereits wieder dem Bistum Regensburg, nachdem es im Zuge der Säkularisation um 1810 einen Besitzerwechsel gegeben hatte, bei dem sie zusammen mit dem gesamten Areal des Hochstiftes an Bayern gefallen war. Noch im gleichen Jahr veräußerte das Königreich die Brauerei an den Regensburger Bierbrauer Emmanuel Eltele, der den Braubetrieb sogleich wieder aufnahm. Erst 1852 kaufte das im Jahre 1821 wieder errichtete Bistum Regensburg den Bischofshof samt Brauerei als Pfründe für die sechs Jahre zuvor errichtete bischöfliche Knabenseminarstiftung zurück.<sup>21</sup>

Der eingebaute Zustand der porta praetoria blieb bis 1865 unverändert. Das belegen Planzeichnungen zur Maschineneinrichtung im Erdgeschoss der Brauereigebäude. Der „*Situationsplan für die Maschinen Einrichtung in der Brauerei Bischofshof in Regensburg*“ ist als Grundriss im Maßstab 1:500 angelegt, in dem der Turm und die anschließende Mauer mit dem Tor als Umrisslinie angedeutet sind. Der Schankkeller und der darüber liegende Maschinenraum grenzen unmittelbar an die Ostmauer des Turmes an (Abb. 8).

Im Katasterplan mit der Datierung „1870“ werden die Einbausituation des Ostturmes der porta praetoria und das römische Westtor noch in gleicher Weise dargestellt wie in den Katasterplänen von 1812. Allerdings ist hier der westliche Schwibbogen bereits verschwunden und der in der Mitte gelegene aus dem Plan retuschiert, so dass als einziger der östliche der Bögen verblieben ist. Der Katasterplan mit der Datierung „1870a“ zeigt jedoch wieder den mittleren Schwibbogen, was mit Abrissplanungen der Schwibbögen in Zusammenhang gestanden haben mag oder einen Zwischenzustand der Ausführungen anzeigt.<sup>22</sup>

<sup>20</sup> Rainer Brunner, Die Kontroverse um die Gestaltung der 1885 wieder entdeckten Porta Praetoria in Regensburg. VHVO 140, (2000) 18.

<sup>21</sup> ebd. 19, 20.

<sup>22</sup> Der Plan von „1870“ enthält bereits die Lokalisierung der Lagermauer der ehemaligen römischen Castra Regina und der zugehörigen Baulichkeiten als transparente grafische Überlagerung.

Die Einbausituation der porta praetoria wurde auch im Bauantrag von 1878 unverändert übernommen: So ist im „Plan über das Einwölben des Sudhauses und das Errichten einer Wohnung in der Brauerei Bischofshof“ die zur Straße hin errichtete Mauer, welche die porta praetoria umgab, wiederum eingezeichnet. Aus der Übersichtsdarstellung wird die Planung noch deutlicher. So hatte man in der ersten Etage des Sudhauses die Einrichtung einer Wohnung vorgesehen, deren Treppengang unmittelbar an der Turmostwand in das Erdgeschoss hinab verlaufen sollte. Der Umbau war zum großen Teil als Eisenkonstruktion konzipiert (Abb. 9), was für diesen Bauwerktypus durchaus üblich war und de facto ausgeführt wurde, wie auf den Abbruchfotografien des Sudhauses von 1910 gut zu erkennen ist.<sup>23</sup>

### *Das späte 19. Jahrhundert und die Wiederentdeckung*

In dem Katasterplan von 1880 sind nun endgültig alle mittelalterlichen Schwibbögen verschwunden; übrig bleibt lediglich die Straßenbezeichnung „Unter den Schwibbögen“. Quasi amtlich hatte man das „Römer-Thor“ im Plan fixiert und wie andere bedeutenden Gebäude der Stadt schwarz hervorgehoben. Das ist insofern verwunderlich, als die porta praetoria erst am Samstag, den 16. Mai 1885 *offiziell* vom bischöflichen Administrator Anton Ebenhöch entdeckt wurde. Die zeitliche Diskrepanz kann auf einer Nachbesserung der Unterlagen um 1885 beruhen. Eher unwahrscheinlich ist es, dass bereits die ersten Beschreibungen des Grafen Hugo von Walderdorff im Jahr 1869 zu den Neuerungen im Katasterplan führten, zumal der Graf zunächst nur auf den Turmbau eingeht:

*„Die interessanten Ueberbleibsel finden sich in dem Holzmagazine des Schreiners Fugger unter den Schwibbögen, wo man sogar noch Spuren des Gesimses sieht, dann nebenan in den Kellern und dem Bräuhaus des Bischofshofes; in letzterem steht auch noch der einzig erhaltene Hochbau aus Römerzeit, der aber merkwürdigerweise von keinem Forscher erkannt und berücksichtigt wurde. Der dortige halbrunde Thurm ist nämlich in seinen unteren Theilen ein vollständig erhaltener Flankenthurm eines röm. Propugnaculum's; hier war auch die porta praetoria, welche im frühen Mittelalter noch als porta aquarum – vorkömmt;“<sup>24</sup>*

Die 1886/1887 begonnene Freilegung der porta praetoria und die anschließende Gestaltung des Umfeldes gerieten zu einem langwierigen Prozess, nicht zuletzt, weil aufgrund der allzu unterschiedlichen Vorstellungen keine Einigung erzielt werden konnte. Das erste Problem war der Abriss des Vorbaus. Die bischöfliche Administration beharrte auf einem Ersatz für dieses Gebäude, der ausschließlich in Form des östlich benachbarten Lagerhauses des Kaufmanns Hüttinger akzeptiert wurde. Hüttinger verlangte die hohe Summe von 20000 Mark, die schließlich zu einem großen Teil vom Ministerium, zu einem kleineren Teil von der bischöflichen Administration übernommen wurde.

Die Stadt wollte mit ihrem Budget zur Restaurierung der porta praetoria beitragen. Der Abriss des Vorbaus war mit 300 Mark vergleichsweise günstig veranschlagt und kostete schließlich nur 252,50 Mark. Bis zu diesem Zeitpunkt waren in dem Obergeschoss des 28 Meter langen und 4,5 Meter breiten Anbaus die Brauburschen der Bischofsbrauerei untergebracht. Im Erdgeschoss befand sich eine

<sup>23</sup> siehe Abbildung 18.

<sup>24</sup> Von Walderdorff, Hugo, Regensburg in seiner Vergangenheit und Gegenwart, Regensburg (1869) 25.

(Fass-) Binderei, in der Fässer hergestellt und repariert wurden.<sup>25</sup> Am 17. Dezember 1887 berichtete dann das Regensburger Morgenblatt schließlich von der vollständigen Freilegung.<sup>26</sup>

Es dauerte nicht lange und es entwickelte sich eine heftige Kontroverse über die weitere Gestaltung der römischen Relikte. Die bischöfliche Administration wollte nicht soweit gehen wie das Staatsministerium, das sich den Blick auf das römische Niveau wünschte, das man 1885 glaubte ergraben zu haben. Damit präferierte der Staat die Pläne des Pfarrers Joseph Dahlem. Noch vor dem „Abbruch des Vorbaus“ skizzierte dieser 1886 die porta praetoria und fertigte im März 1887 eine weitere Zeichnung zur Vorstellung bei der „Comissions Sitzung“ an (Abb. 10). Vorgesehen war die Freilegung des Gebäudes auf das ursprüngliche römische Niveau. Daher musste ein Graben in die Planungen einbezogen werden, der nach Dahlem mit einer Brüstung umgeben werden sollte und den Durchgang durch das Tor in den Bischofshof nur über eine Brücke erlaubte (Abb. 11).

Demgegenüber befürchtete die bischöfliche Administration statische Probleme und wollte das angenommene römische Niveau in circa 1,70 Meter Tiefe in einem Schacht gefasst wissen, der mit Stahlplatten abzudecken sei und als Überbrückung für den Tordurchgang dienen sollte. Für besondere Anlässe hätten die Stahlplatten abgehoben werden können.

Der Vorstellung wurde in dem von Domvikar G. Dengler vorgelegten Entwurf im Mai 1887 „*Project (ohne offenen Graben)*“ Raum gegeben. Dengler wollte das Bild einer Toranlage mit rekonstruierenden Elementen entstehen lassen: In seinem Plan ist das untere Turmgesims auf der Fassade des Bischofshofes bis zu den Resten des vermeintlichen Westturmes weitergeführt und über zusätzliche Quader mit diesem verbunden. Die Wand östlich des Torbogens vervollständigte er zeichnerisch durch hinzugefügtes Mauerwerk und verband damit optisch den Torbogen mit dem östlichen Flankenturm (Abb. 12 und 13).

Die verhaltenen Rekonstruktionsversuche schlugen sich auch in den Plänen Dahlems nieder, der in seiner im März 1887 entstandenen Zeichnung zur Vorlage bei der „Commissions Sitzung“ ebenfalls eine geschlossene Fassadenansicht anstrebte und gleich ein zweifaches Gesims vom Turm bis zu den Quadern des vermuteten westlichen Flankenturmes zog und dieses in eine Pilastergliederung mit Architrav münden ließ, in der zwei Gedenktafeln eingelassen werden sollten.<sup>27</sup> Dass die westlich gelegenen Quader bereits 1886 dem westlichen Flankenturm zugeschrieben wurden, zeigte Dahlem in seinem „*Grund[riss]plan II vor Abbruch des Vorbaus ...*“.<sup>28</sup>

Bei der Ausführung der „Restauration“ orientierte man sich letztlich an Denglers Entwürfen; denn der Aufwand für die Absenkung bis auf römisches Niveau konnte nicht abgesehen werden, wie man während der durchgeführten Probegrabungen erkennen musste, so dass die Planung eingestellt wurde.<sup>29</sup>

Unabhängig von der Freilegung der porta praetoria gingen die Maßnahmen zum Umbau der Brauerei weiter. Im Juni 1887 wurden weitere Pläne zur Umgestaltung

<sup>25</sup> Rainer Brunner (2000) 18.

<sup>26</sup> ebd., 28–32.

<sup>27</sup> siehe Abbildung 10.

<sup>28</sup> Bis heute hat die Hypothese zur Rekonstruktion der porta praetoria ihre Gültigkeit nicht verloren, wie aus den Rekonstruktionsplänen von 1971 hervorgeht. Diese wiederum waren die Grundlage für ein Holzmodell, das den Bau der porta praetoria zur Römerzeit darstellt.

<sup>29</sup> Rainer Brunner (2000) 33 ff.

des „Bräuhauses“ vorgelegt. Der eine betraf „... die Herstellung eines Reservekessels“, der andere die Planung einer „Doppelsudwerksanlage“ für die Brauerei Bischofshof. Im Lageplan ist nun, wie bereits im Katasterplan von 1880 erstmals dokumentiert, das Gebäude in seiner Nord- und Westansicht vom umliegenden Gemäuer befreit dargestellt. Die 1878 geplante Treppe vom Obergeschoss in das Parterregeschoss entlang der Turmwand ist nicht mehr verzeichnet und wohl auch nicht ausgeführt worden. Das veranschaulichen die Aufnahmen, die während des Sudhausabbruchs angefertigt wurden und in denen es keine Hinweise auf eine fest installierte Treppe gibt.

Aus den bisherigen Ausführungen lässt sich ableiten, welche Bedeutung der quellenkritischen Auseinandersetzung mit Dokumenten, Zeichnungen, Plänen und Schriften bei der Bewertung geschichtlicher Ereignisse zukommt. Trotz aller Detailgenauigkeit und zeichnerischen Schärfe hat man es immer noch mit subjektiven Zeugnissen zu tun. Aus diesem Grund war die Einführung der Fotografie nach 1860 ein Quantensprung in der Dokumentationstechnik. Denn die Erstellung regelmäßiger Aufnahmen von der porta praetoria nach 1885 sind – trotz der fotografischen Unzulänglichkeiten und der in den kommenden Jahren immer wieder wechselnden Vorliebe für bestimmte Standorte – von großer Bedeutung für die Interpretation der Befunde an der Fassade und die Rekonstruktion ihrer expositionsbedingten Veränderungsgeschichte.

#### *1887/1888: Erste Fotografien nach der Freilegung*

Das erste erhaltene Bild ist in das Jahr 1887 datiert und zeigt die Vermauerung des Torbogens mit Putzresten auf römischen Quadern, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht entfernt worden waren. 1450 bis 1457 hatte Bischof Friedrich III. von Plankenfeld den Nordflügel des Bischofshofes verändern lassen.<sup>30</sup> Im Zuge dieser Arbeiten wurde vermutlich der kurze Mauerabschnitt zwischen dem Torbogen und dem östlichem Flankenturm wandbündig mit Ziegeln und Einzelquadern auf den Fundamenten der Römermauer erbaut. Auch der Torbogen wurde mit einer Ziegelmauer, die man einen halben Meter zurückgesetzt hatte, verschlossen.<sup>31</sup> Ob die fotografisch dokumentierte Mauer auf Bischof Friedrich III. zurückgeht oder in eine jüngere Zeit datiert, ist nicht zu rekonstruieren, da keine Befunde erhalten sind. Aus den Wandanschlüssen des Bischofshofes an den Ostturm der porta praetoria könnte auf einen originalen Befund geschlossen werden. Tatsache ist, dass der nach der Errichtung der Mauer auftretende Wunsch, den Bogen in eine ebenmäßig geputzte Nische zu verwandeln, seine Spuren an der Laibung des Bogens hinterlassen hat und handfeste Materialverluste verursachte.<sup>32</sup> Mit dem Wegschlagen von Quadervorsprüngen und dem Auftragen einer dicken Putzschicht auf dem Quader- und Ziegelmauerwerk war der markante Torbogen zumindest für viele Generationen unkenntlich geworden.

Weitere Fotografien sind vom königlich bayerischen Hofphotograph Johann Laifle erstellt worden, der die Situation der porta praetoria mit dem Sudhaus an der Ostwand und den Blick auf ihre Nord- und Westseite um 1888 festhielt. Es existiert eine weitere künstlerische Darstellung dieser Situation, die der Fotografie von Laifle

<sup>30</sup> Vgl. Stauffer Edmund, *Der Bischof in Regensburg*, 12.

<sup>31</sup> Fink, Joseph, *Regensburg in seiner Vorzeit und Gegenwart*, Regensburg (1886) 4.

<sup>32</sup> Vgl. *Regensburger Morgenblatt*, 19. Mai 1885.

aber so nahe kommt, dass es sich um eine Bildkopie der Fotografie handeln könnte (Abb. 14 und 15): In der Federzeichnung sind Oberflächen besonders hervorgehoben. Beispielsweise ist die „wellig“ angelegte Struktur des Putzes betont dargestellt. Die Wiedergabe der Bausituation – unter dem Torbogen sind immer noch Stahlplatten verlegt, mit denen auf Wunsch der bischöflichen Administration die Grabung abgedeckt worden war – und die Tatsache, dass noch keine Befestigung des Schotterweges bestand, mögen die nicht abgeschlossenen Verhandlungen über die Gehweg- und Vorplatzgestaltung veranschaulichen. Auch die Steinquader des Tores sind auf den Aufnahmen noch nicht von Putzresten befreit, vermutlich, um die Bogensteine in einem nicht allzu zerklüfteten Zustand erscheinen zu lassen. Allerdings ist in Anlehnung an die Vorschläge von Pfarrer Dahlem und Domvikar Dengler ein geputztes Gesims über dem Tor in Höhe des dreifach faszierten Turmgesimses angelegt und der Putz in einem exakten Bogen und mit einer abschließenden Fase von den Torbogensteinen abgegrenzt.<sup>33</sup> Offensichtlich wurde nach dem Abriss des Vorbaus nur der Putz des unteren Fassadenabschnittes und des ähnlich hell erscheinenden, verputzten Turmobergeschosses renoviert, denn die anderen Putzabschnitte wirken dunkel und anders strukturiert. Die tatsächliche Höhe des Vorbaus ohne Dachgeschoss, dürfte zwischen dem über dem Tor angelegten Putzgesims und den Gesimsen der ersten Fensterreihe gelegen haben.

Dass die Nutzung des Vorbaus als Fassbinderei ihre Spuren auf den Quadern des Turmes hinterlassen hat, ist unzweifelhaft: Besonders fällt das fleckig geschwärzte Mauerwerk auf der westlichen Turmseite auf. Ursache könnte ein Brand gewesen sein, wahrscheinlicher ist aber der Betrieb einer stark rußenden Feuerstelle und die intensive Nutzung des überdachten Gebäudetraktes als Werkstatt, deren Spuren als „Schmutzabdruck“ auf den Quadern haften blieb.

Anzumerken ist die erstmals nachzuweisende Einführung eines Blitzableiters, der bereits kurz nach der Freilegung der porta praetoria angebracht wurde und bis heute dort verblieben ist.

### *Das Ergebnis der Freilegung und „Restauration“*

Im Gegensatz zu der anfänglichen Euphorie, die dazu führte, dass das „Römer-Thor“ im Katasterplan von 1870 explizit ausgewiesen wurde, hat man während der folgenden Planfeststellung von 1890 auf eine entsprechende Betonung verzichtet. Dies mag an veränderten Kriterien gelegen haben, die in gleicher Weise auch andere Gebäude in der Innenstadt betrafen. Eingezeichnet ist nun der Vorplatz vor der porta praetoria, der in Verlängerung zur nördlichen Sudhausmauer in der Straße nach Westen hin keilförmig ausläuft und das Ergebnis der Diskussion um die Gestaltung und Restaurierung der porta praetoria in den Jahren 1886/87 ist.

In einem Grundriss- und Ansichtsplan zur Restaurierung von 1891 wurde – in Annäherung an die Vorschläge Denglers – die tatsächlich realisierte Freilegung und Gestaltung des Umfeldes dokumentiert. Im Schnitt, in der Ansicht und im Grundriss wird gezeigt, dass nur eine kleine Grabungsöffnung unter dem linken Torbogen belassen und mit einer Stahlplatte abgedeckt wurde. Damit war die Diskussion um das „Project eines offenen Grabens“ zur Begehung der römischen Fundamente endgültig vom Tisch und der flankierende Gehweg wurde nicht vertieft, sondern auf Straßenniveau belassen (Abb. 16). Unabhängig von dem repräsentativen Charakter

<sup>33</sup> Im Detail auf dem Foto von 1926 sichtbar.

suchte man letztendlich nach einer einfachen Lösung ohne den Alltagsbetrieb allzu sehr zu stören, denn die anhaltende Nutzung des römischen Turmes als Teil der Brauerei stand offenbar nie zur Debatte. Das veranschaulichen die Freilegungspläne und der in der Maßnahmendokumentation weiterhin eingezeichnete Durchgang vom Sudhaus in das Turmuntergeschoss.

Fotografien und Postkarten um 1900 bestätigen die durchgeführte Freilegung. Die Pflasterung zieht sich von der Straße ebenerdig bis zur porta praetoria; eine Stahlplatte unter dem Torbogen erinnerte bis in die 1980er Jahre an die Idee einer „offenen Tiefausgrabung“. Auf den Aufnahmen erscheint der Putz der Torbogenfassade und des Turmes bereits sehr fleckig und schadhafte. Ursache war die schadhafte Wasserführung am Bauwerk, die sich an der gesamten Nordfassade des Bischofshofes in Form von Laufspuren unterhalb der Dachrinnen ablesen lässt.

Dagegen wirkt die in den früheren Fotografien zu beobachtende schwarze Verfleckung am Turmuntergeschoss der Westseite deutlich abgeschwächt. Der Eindruck kann auch durch die Verschmutzung der umgebenden Werksteine hervorgerufen werden, die somit einen deutlich geringeren Kontrast zu den verschwärzten Bereichen bilden. Auffallend ist die hinzu gekommene weiße Fleckenbildung, die bis heute sichtbar ist und u. a. auf kalkhaltiges Wasser zurückgeht, wie es zum Blumen gießen verwendet wurde (und wird, und unvermindert vom zweiten Turmobergeschoss auf arglose Passanten am Fuß des Turmes heruntertropft). Von größerer Relevanz sind allerdings die Folgen von Schlagregen, Regenwasser und undichten Regenrinnen. Seit der Freistellung des Bauwerks konnte die Witterung ungehindert angreifen und Wasser aufgrund der westlichen Exposition auf die Fassade und die Kalksteinoberfläche gelangen, kalkhaltige Bestandteile „ausspülen“, mit Schwefeldioxid Gips bilden und das Bild der Oberfläche in die schwarze oder weiße Richtung mutieren.

In der Zeit zwischen 1900 und 1910 wurde die porta praetoria schließlich elektrifiziert, was sich anhand der Isolatoren am Turmobergeschoss und der westlich gelegenen Nordfassade ablesen lässt. Im Zuge dieser Maßnahmen kaschierte man auch Putzschäden und Feuchtflecken, so dass die Fassade auf den Fotografien aus der Zeit nach 1910 wieder einen einheitlicheren Eindruck hinterlässt (Abb. 17). Einem Abspann gleich taucht in der letzten Fotografie dieses Zeitraums im Hintergrund bereits ein erstes Gerüst auf, das auf den drohenden Abriss des Sudhauses hinweist.

### *1910: Abruch des Sudhauses – Die „Freilegung“ der Ostwand*

1910 beschloss man, die Brauerei wegen Platzmangels in den Westen der Stadt zu verlegen und das nun überflüssig gewordene Sudhaus abbrechen zu lassen; der entstehende neue Platz wurde Römerhof genannt.<sup>34</sup> Der Abriss öffnete den Blick auf die Eisenträgerkonstruktion und die mächtige Ziegelmauer, die als Fortsetzung der Mauer des Ostturmes die Westmauer des Sudhauses bildete. Aus den Aufnahmen wird der katastrophale Zustand der Dachrinne an der Ostwand der porta praetoria deutlich (Abb. 18). Den Abrissfotografien ist zudem der Dachansatz des Sudhauses am Ostturm und die Eingänge in das Untergeschoss des Turmes zu entnehmen. Gut ablesbar ist auch der Verlauf eines Kaminzuges vom ersten Geschoss des Sudhauses an der Wand des Ostturmes entlang. Der Kaminzug verlief über das südliche Rundbogenfenster im ersten Geschoss des Ostturmes, das bis zum Zeitpunkt des Ab-

<sup>34</sup> Rainer Brunner (2000) 19.

bruchs komplett vermauert gewesen sein muss. Die im ersten Obergeschoss eingebauten Türen sind heute zu Fenster umgebaut, die Sudhaustüre im Erdgeschoss zum Turm wurde mit großen Quadern zugesetzt.

Nach dem Abriss des Sudhauses muss es eine Instandsetzung der Ostfassade und des Turmes gegeben haben. Fotografien fehlen gänzlich: Es existiert lediglich eine in das Jahr 1910 datierte Aquarellzeichnung, auf der eine fragmentarisch verputzte Ostfassade zu sehen ist und zudem die Anlage eines Grabens, der den Blick auf die römischen Fundamente der Ostwand erlaubte. Renovierungsmaßnahmen an den angrenzenden Gebädetrakten des Bischofshofes sind dagegen zweifelhaft, was aus dem nach wie vor stark geschädigten Putz der Nord- und Westfassade hervorgeht.

In der Zeit von 1910 bis 1913 war übergangsweise ein Bauzaun errichtet worden, der von der ehemaligen Sudhaustür im Erdgeschoss nach Osten verlief und den künftigen Römerhof von der Straße abgrenzen sollte. Das Provisorium wurde durch eine etwa 2,5 Meter hohe Gartenmauer aus Naturstein mit Biberschwanzabdeckung abgelöst. Zumindest eine, als Segmentbogen ausgebildete und vergitterte Öffnung durchbrach die westliche Mauerhälfte; vielleicht, um einen Blick auf die Fundamente an der Ostfassade zu gestatten. Das mittig angelegte Tor wurde von zwei großen Pfeilern flankiert. Erst in den späten 1970er Jahren ersetzte man die hohe Mauer durch ein knapp kniehohes Mäuerchen.

#### *Die porta praetoria im Detail*

Die ersten Detailaufnahmen des Quadermauerwerks wurden an einem sonnigen Nachmittag im Jahr 1917 zu später Stunde von der Nordseite des Turmes aufgenommen. Durch das Streiflicht der Abendsonne erzielte der Fotograf ein streckenweise sehr scharfes Bild der Oberfläche. Spitzzeisenspuren, Schäden und bautechnische Details treten deutlich zutage und zeugen erstmals von der Bearbeitung und den Nutzungsspuren in der römischen Oberfläche. So hatte man sich nicht gescheut, quadratische Aussparungen für die Dachkonstruktion des Anbaus in die Mitte von Fassadenquadern oder in das dreifach faszierte Gesims zu schlagen. Zudem wurden Auflager für Treppenstufen vom Erd- in das Obergeschoss eingeschlagen (Abb. 19).

Leider führte das schräg von Westen einfallende Licht zu Über- und Unterbelichtungen, was vor allem die Randbereiche undeutlich werden lässt. Ähnliche Detailaufnahmen von 1924, die das Ober- und Untergeschoss des nordwestlichen Turmabschnittes betreffen, leiden weniger unter Über- und Unterbelichtungen als vielmehr unter Unschärfe.

#### *Die 1920er Jahre – Zeitalter des Aufbruchs und die neue Mobilität*

Übersichten aus den Jahren 1924–1926 zeigen den katastrophalen Zustand des gesamten Fassadenputzes, der in der offenbar desolaten Wasserführung am Gebäude begründet war. Insgesamt macht die porta praetoria einen stark vernachlässigten Eindruck (Abb. 20). Der Straßenbau forderte bereits zur damaligen Zeit sein Recht ein: Denn im Zuge des langsam aufkeimenden Kraftfahrzeugverkehrs wurde ein Gehweg entlang der Gartenmauer bis zum Ostturm angelegt. Auch verschwanden die Porzellanisolatoren teilweise vom Turm und von der Nordfassade, während auf der Ostseite neue installiert wurden, die erstmals auf Fotografien von 1940 erkennbar sind.

Ein wichtiges Kriterium für die zeitliche Einordnung ist die unterschiedliche Antragung des Putzes um den Torbogen. Während auf den Fotografien um 1926 die gefaste Putzkante der wahrscheinlich ersten Verputzung nach der Freilegung der porta praetoria zu sehen ist, lässt die Anputzung des Torbogens nach der Sanierung von 1927 eine einfache Anböschung erkennen. Weiterhin verfuhr man auch mit der Gestaltung der östlich vom Torbogen verlaufenden Putzkante zum Turm hin unterschiedlich. War diese um 1926 noch gerade angelegt, setzte man 1927 die Kante in zwei Stufen nach oben ab, da die vorhergehende Variante offenbar zu einfach oder nicht richtig erschien. Andere als ästhetische Gründe lassen sich nicht anführen.

Beinahe symbolisch ist der Übergang vom Kutschenzeitalter in die Autogesellschaft gezeigt: In einer Fotografie um 1926 sind hinter dem Torbogen im Bischofs-hof Kutschen zu erkennen, während in der Aufnahme von 1927 an dieser Stelle bereits ein Automobil steht (Abb. 21 und 22).

Von der umfangreichen Fassadensanierung im Jahre 1927 ist glücklicherweise eine Fotografie von der Baustellensituation vor dem Rundbogen erhalten. Daraus ist zu ersehen, dass der Fassadenputz im unteren Bereich bis in eine Höhe von drei Metern abgeschlagen wurde. Das ist nicht verwunderlich, denn die Sockelzone entlang der Torbögen stand wiederholt als Problembereich im Vordergrund von Sanierungsmaßnahmen. Das freiliegende Ziegelmauerwerk eröffnet Einblicke in die frühere Fassadenabwicklung. So zeigt sich rechts vom Torbogen im Sockelbereich unterhalb der Gedenktafel ein großer zugemauerter Bogen aus Ziegel, und weiter westlich, unmittelbar rechts neben den vermuteten Resten des westlichen römischen Flankenturmes ein kleiner Eingang, der etwa einen halben Meter über Bodenniveau auf einem Quader – vermutlich römischer Herkunft – aufsetzt und in den Bischofs-hof führt. Der Eingang war seit Jahren nicht mehr genutzt worden und scheint nur während der Sanierung geöffnet gewesen zu sein (Abb. 23).

Nach der Sanierung von 1927 erstrahlte die Putzfassade der porta praetoria in neuem Glanz. Das Mauerwerk selbst war anscheinend nicht durchgreifend saniert worden. Der detaillierte Vergleich von Mauerwerk und Mörtelausbesserungen auf Fotografien, die nach der Sanierung 1927 angefertigt wurden mit den zehn Jahre älteren Aufnahmen von 1917 bestätigt die Vermutung einer auf eine Putzsaniierung beschränkten Maßnahme: Insbesondere Ausbesserungen, die bereits 1917 bestanden, blieben erhalten. Auch die Ziegelausmauerungen wurden nicht verputzt. Der Torbogen bekam, wie bereits beschrieben, eine angehöschte Putzkante, die zum Turm hin stufig nach oben verlief. Die Putzgrenzen an der Ostfassade hatte man weitgehend übernommen.

Weiterhin war man in Sachen Gehweg vorangekommen: Das erhöhte Trottoire führte nun auch am Tor vorbei, wobei die Eisenplattenabdeckung der Fundamente im Torbereich erhalten blieb. Auffallend ist, dass in den überlieferten Fotografien von 1927 bis in die 1950er Jahre der Ostturm ausschließlich von der Ostseite aufgenommen wurde, die anscheinend nach der Neuverputzung zur „Schauseite“ geworden war.

### *Die schwierigen 1930er Jahre und „die kleine Sanierungsmaßnahme“ in den 1940/1950er Jahren*

Bereits sieben Jahre nach der Neuverputzung sind auf den Aufnahmen von 1935 wieder Anzeichen einer Putzverfleckung zu beobachten. Auf den Fotografien von 1938 bis 1940 deuten sich bereits weitreichende Putzschäden im unteren Bereich

der Nordfassade an. Die großzügige Putzerneuerung von 1927 hatte nicht die Ursache der wiederkehrenden Schäden beseitigen können, die primär auf desolate Dachrinnen und defekte Fallrohre zurückgingen. Es dauerte nicht lange und das Schadensbild prägte auch die oberen Stockwerke der Nordfassade.

Im Jahr 1948 hatte sich der Zustand des Fassadenputzes an der Ostfassade und der Nordfassade des Bischofshofes, einschließlich des Bereiches um den Torbogen, drastisch verschlechtert; der Putz bröckelte großflächig ab. Die Fassade ähnelte sehr der von 1926 vor der Sanierung. Einziger Lichtblick in jener Zeit war die Einrichtung einer elektrischen Straßenbeleuchtung auf dem Gehsteig vor dem Römerhof und die um 1940 gepflanzten Bäume innerhalb des Hofgevierts (Abb. 24).

In den Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg (1948 bis 1955) sollte dem trostlosen Anblick eines abbröckelnden Bischofshofes mit einer kleinen Sanierungsmaßnahme ein Ende gesetzt werden. Da die Putzkanten um das Tor und die Gesimskante oberhalb des Tores nicht verändert wurden, ist von einer beschränkten Putzergänzung mit Neuanstrich auszugehen. Dabei wurde nicht nur die Putzfassade in die Maßnahme einbezogen, sondern auch das Natursteinmauerwerk, das zusammen mit dem Bischofshof ein einheitliches, aber auch dunkleres Erscheinungsbild zeigt und „einretuschiert“ wirkt. Hörmann merkt dazu an:

*„In wohlmeinender Absicht, aber ohne fachliche Anleitung wurden die prächtigen Werksteine zum Teil mit einer stumpfen, viel zu schweren und kalten Tünche von grauschwarzer Farbe überzogen, die Fugen überschmiert und die Putzpartien dazwischen farbig dazugestimmt.“<sup>35</sup>*

Zur selben Zeit bemühte man sich um einen geschlosseneren Eindruck des römischen Mauerwerks an der Ostfassade. Wo vorher die Putzgrenze mit den römischen Mauerquadern verlief und ein fragmentarisches Bild der römischen Mauer an die Wand zeichnete, sollte nun an den Stellen, an denen römische Quader fehlten, eine Art „Fassadenretusche“ durchgeführt werden. So wurden zur Ausbildung gerader Kanten fehlende Natursteinbereiche vom Turm bis zu den südlich gelegenen römischen Quadern entlang der Fenstergesimse des ersten Obergeschosses überputzt, dunkel gestrichen und mit einer willkürlichen, das Mauerwerk imitierenden Ritzung versehen. In derselben Weise ging man an der südlichen Mauerwerksgrenze vor, an der die fehlenden römischen Quader putztechnisch vertikal nach unten ergänzt und horizontal mit dem bestehenden Mauerwerk verbunden wurden. Die aus der Not geborene Lösung erregte kurze Zeit später den Unmut der staatlichen Denkmalpflege (Abb. 25).

#### *Die Reduktion auf das Wesen(tliche) – Die Restaurierung von 1958*

Um die denkmalpflegerische Intention der Wahrung des römischen Originals umzusetzen, entschloss man sich 1957–1958 zu einer umfassenden Re-Restaurierung des Gebäudes. Dabei stand die Zurücknahme aller ergänzenden Maßnahmen im Mittelpunkt der Ausführungen, was insbesondere die Ostfassade betraf. Angestrebt war u. a. eine Rückführung des Putzkonzeptes, das dem der Restaurierung von 1927 verblüffend ähnelte. Noch im Vorgriff auf die geplante Sanierung hatte man bereits vor 1958 die Nordfassade des Bischofshofes renoviert. Die veränderten, „weich“

<sup>35</sup> Hörmann, H., Die Instandsetzung der Porta Praetoria des römischen Legionärlagers zu Regensburg. Jahresbericht des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege 18, München (1959) 18 ff.

angelegten Putzkanten um das Tor und die fehlende Gesimskante darüber sprechen für eine partielle Neuverputzung. Dass diese Maßnahme nur bedingt erfolgreich war, zeigt die nach wenigen Jahren auftretende Verfleckung des Putzes, die sich wiederum bevorzugt auf die unteren Fassadenabschnitte beschränkte.

Im Mittelpunkt der Sanierungskampagne im September 1958 stand die Restaurierung des römischen Quadermauerwerks, was die fotografische Dokumentation des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege belegt. Die Aufnahmen wurden während der Gerüststellung gemacht und zeigen vor allem die nach der Abnahme der Putzfelder freiliegenden Ziegelausmauerungen an der Ostfassade und am Turm. Das Anbringen einer Gipsplombe als Rissüberbrückung auf dem Ziegelmauerwerk unter dem nördlichsten Fenster der Ostwand deutet auf das Misstrauen in die statische Sicherheit des Gebäudes (Abb. 26).

Die Maßnahme selbst umfasste nicht nur eine Neuverputzung der Ziegelausmauerungen, sondern auch eine Reinigung und Retusche des Quadermauerwerks. Dabei wurden die erst 1948 aufgetragenen Mörtel wieder weitgehend entfernt, Ausbesserungen hinter das römische Original zurückgearbeitet und ein Kellenglattstrich aus Sumpfmörtel aufgebracht. Hörmann brachte diese Vorstellungen folgendermaßen zu Papier:

*„So ergaben sich überall dort, wo Quadersteine heute fehlen, leicht vertiefte Felder von der nämlichen Oberflächenbeschaffenheit, wie sie die Umgebung aufweist: Damit wurde ein weicher harmonischer Übergang erzielt, so dass Tor und Turm trotz der fehlenden Quader jetzt geschlossen wirken. Die Innenflächen der Fensternischen wurden in derselben Weise verputzt und all diese Partien in der graugrünen Farbe der Hotelfassaden abgetönt. Ein mehrmaliges Lasieren mit dunkleren Farbmischungen ließ harte Übergänge vermeiden. Auch die bündig oder gar nicht verfugten Stoßfugen sind so behandelt worden. [...] Nach Angabe des Bauamtes wurde die zum Teil beträchtliche Ruß- und Schmutzschicht der einzelnen Quader mit Hackerscher Steinbeize, die in ähnlichen Fällen schon früher mit Erfolg Verwendung gefunden hat, so entfernt, dass die natürliche Patina, eine Art von Wetterkruste des Kalksteins, erhalten blieb.“*

Tatsächlich erscheint das Quadermauerwerk nach der Sanierung heller und die Steinoberfläche strukturierter, allerdings zugunsten einer erhöhten „Fleckigkeit“. Auffallend sind die Verschwärzungen im Sockelbereich und helle Ablagerungen (Abb. 27).

In den Zustandsaufnahmen nach der Sanierung von 1958 ist erstmals ein hellbeige aufgemalter Doppelbalken ohne Inschrift im Sockelbereich der nordwestlichen Turmseite zu sehen, der bis zum heutigen Tag erhalten ist. Fotografien aus den 1930er und 1940er Jahren zeigen diese Turmansicht nicht. Man kann also nur vermuten, dass es sich bei der Markierung um einen Hinweis aus der Kriegszeit handelt.

#### *1969 bis 1979: Generalsanierung des Bischofshofes – Grund für eine ausführliche Fotodokumentation*

Die Anzahl der in den 1970er Jahren aufgenommenen und archivierten Fotografien von der porta praetoria ist sehr viel größer als in den Jahren und Jahrzehnten zuvor. Dies ist auf die konsequente und genaue Dokumentation durch das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege zurückzuführen, das vermutlich im Zuge der

Generalsanierung des Bischofshofes von 1967 bis 1979 das Quadermauerwerk detailliert aufnahm. In den Fotografien wurde die porta praetoria nicht nur in zahlreichen Übersichten dargestellt, 1971 wurden zudem Details der Steinbearbeitung und Bautechnik im Bereich des dreifach faszierten Gurtgesimses der Nord- und Nordostseite des Turmes sowie der stark verfleckte Putz im Sockelbereich der Nordfassade dokumentiert. 1974 folgte eine weitere ausführliche Fotoserie. Der Turm mit der Ostwand, der Torbogen auf der Nordseite und die Innenräume des Turmes sind in Übersichts- und Detailaufnahmen dargestellt. Deutlich sind bautechnische Details wie die in die Quader oberhalb des Gurtgesimses eingeschlagenen quadratischen Balkenaufleger oder der auf der Ostseite angebrachte Kaminzug mit vorkragenden Konsolsteinen zu sehen (Abb. 28).

Insgesamt wirkt das Quadermauerwerk in den 1970er Jahren, also nur knapp zwanzig Jahre nach der Sanierung von 1958, extrem verschmutzt: Der Kontrast der schwarzen Sockelzone zum helleren Obergeschoss ist verschwunden und der Turm vermittelt auf den Schwarzweißaufnahmen eine einheitliche Vergrauung. Der Verschmutzungsgrad ist schwer zu bestimmen, denn abhängig von der Belichtung erscheint das Quadermauerwerk heller oder dunkler. Allerdings zeigt die in ähnlicher Weise fotografisch genau dokumentierte porta praetoria dreißig Jahre später, im Jahr 2000, eine derartige Verschwärzung des gesamten Quadermauerwerks, dass dessen Oberflächenstruktur fotografisch überhaupt nur durch eine starke Belichtung zu erfassen war (Abb. 29).

Innerhalb der Generalsanierung des Bischofshofes von 1967 bis 1979 erfuhr der Römerhof eine erneute Umgestaltung: Neben dem Abbau der 2,5 Meter hohen Gartenmauer und der Errichtung eines kniehohen Mäuerchens, wird der öffentliche Zugang von der Straße zu den römischen Fundamenten der Ostwand ermöglicht und mit der Einrichtung der Tiefgarage unter dem Bischofshof eine breite Auffahrt durch den Römerhof gebaut.<sup>36</sup> Sie nimmt einen großen Teil des Platzes ein, so dass heute nur eine kleine grüne Insel verblieben ist, auf der die um 1940 gepflanzten Pappeln das Gebäude mittlerweile überragen (Abb. 30).

Die Umgestaltung ist im Katasterplan von 2001 festgehalten, wobei die Grenzen des Vorplatzes den angegebenen Grenzen im Katasterplan von 1890 entsprechen. Zusätzlich zeichnete man nun die Tordurchgänge sowohl auf der Nordseite wie auch die östliche Zufahrt in den Bischofshof ein. Der Graben, in den man zur Besichtigung der Fundamentquader über eine kleine Treppe hinabsteigt, ist als parallel zur Ostwand verlaufende Linie erkennbar, welche wiederum auf die eingezeichnete Auffahrt in den Bischofshof stößt.

Dass das Interesse an der porta praetoria ungebrochen ist, zeigt die Aufnahme einer Touristengruppe aus dem Jahre 1980, die auf dem schmalen Gehsteig keinen Platz findet und größtenteils auf die Straße ausweichen muss. Die Tourismusströme und die neue Philosophie des Rückbaus des Straßenverkehrs mögen die Gründe gewesen ein, warum man in den folgenden Jahren den Gehsteig verbreiterte und diesen zusätzlich mit gusseisernen Poller zum Abhalten von Falschparkern ausstattete. Mit der Umgestaltung des Straßenraumes um den Ostturm und das Tor war auch eine Neupflasterung verbunden, unter der die Stahlplatte der Zeit um 1900 verschwand.

<sup>36</sup> Vgl. Betz, Karl-Heinz; Hufnagel, Florian, Baualtersplan zur Stadtsanierung Regensburg IV Lit. F, Wittwangerwacht, München 1081, 202–204 (Das Haus wird dort falsch als Haus F 113 bezeichnet).

## *Die zweite und dritte Dimension: Alte und neue Aufnahmetechniken*

Angefangen mit handgefertigten Zeichnungen und Plänen, fortgesetzt mit fotografischen Aufnahmen und fotogrammetrisch erstellten Plänen und weiterentwickelt als verformungsgetreues Handaufmaß, sind bis heute eine ganze Reihe von Dokumentationstechniken zur Erfassung der porta praetoria genutzt worden. Dass der Einsatz von „High-Tech“ nicht zwangsläufig ein besseres Ergebnis hervorbringt, wird durch den Vergleich der Fotogrammetrie aus den 1960er Jahren mit den in der Zeit von 1998 bis 2001 erstellten verformungsgerechten Aufmaßen deutlich (Abb. 31 und 32). Die Fotogrammetrie war eine neue und geschätzte Technologie, die bis heute in Verbindung mit den digitalen 2D- und 3D-Techniken breite Anwendung findet. Allerdings hat man mittlerweile auch erkannt, dass die zeichnerische Rekonstruktion fotografischen Bildmaterials bei figürlichen oder bildhauerischen Details mit Fehlern behaftet ist. Schließlich lässt eine Fotografie zahlreiche Interpretationsmöglichkeiten zu, die vom Bearbeiter abhängig sind und die Schwächen des Verfahrens offenbaren.

Dennoch ist die Fotogrammetrie des Büros Westphal der erste Plan der porta praetoria, der sich um einen maßgenauen Steinschnitt bemüht. Neben den Außenfassaden wurden auch Innenansichten mit Schnitten und erstmals Details der Steinbearbeitung, Risse oder kleinteilige Ausmauerungen maßstäblich festgehalten. Die fotogrammetrische Erfassung und die in den 1970er Jahren erstellte ausführliche Fotodokumentation sind Ausdruck eines ausgesprochen starken denkmalpflegerischen Interesses, das man dem Objekt gegenüber zeigte. Besieht man jedoch die Anzahl an archivierten Fotografien, die in den darauf folgenden Jahren gemacht wurden und berücksichtigt die immer einfacher werdende Aufnahmetechnik, kann man sich des Eindrucks einer gewissen Wahllosigkeit nicht erwehren. Bis 1995 werden etwa im Fünfjahresrhythmus immer wieder Übersichtsaufnahmen erstellt, die zum Teil nur eine Ansicht wiedergeben, keine Systematik aufweisen und sich auf die Wiedergabe einzelner Details kaprizieren.

Erst um das Jahr 2000 rückte die porta praetoria wieder in den Mittelpunkt des Interesses, was dem Engagement der Stadt Regensburg, dem Historischen Verein für Oberpfalz und Regensburg und dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege zu verdanken ist. Ein Meilenstein in der wissenschaftlichen Bearbeitung des Bauwerks ist die von Thomas Aumüller erstellte Bauwerksmonographie, die ein verformungsgerechtes Aufmaß des kompletten Denkmals enthält. Die dezidierte Oberflächenportraittierung zeichnet ein sehr komplexes Bild des römischen Bestandes. Das Resultat der Arbeit sind zum einen dem Bauwerk in realiter entsprechende Maße, zum anderen eine ganze Palette an vertieften Kenntnissen zur Baugeschichte, die in dieser Breite, Präzision und Detailkenntnis jeder rein fotogrammetrischen Abwicklung fehlen.

Die Notwendigkeit konservatorischer Maßnahmen und der Wunsch, die Projektierung der Arbeiten auf ein solides Fundament zu stellen mündeten schließlich in die Beantragung eines Forschungsprojektes bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, das im Januar 2000 genehmigt wurde. Im Rahmen des Projektes wurde im Mai 2000, eine komplette fotografische Abwicklung der Außen- und Innenfassaden der porta praetoria erstellt.<sup>37</sup> Alle diese herkömmlichen Verfahren zur bild- und plan-

<sup>37</sup> Die Fotografien der Außenfassaden wurden von Uwe Gaasch, Bamberg (analoge Fotografie, Papierabzüge) erstellt. Auf Veranlassung des Amtes für Denkmalpflege der Stadt Re-

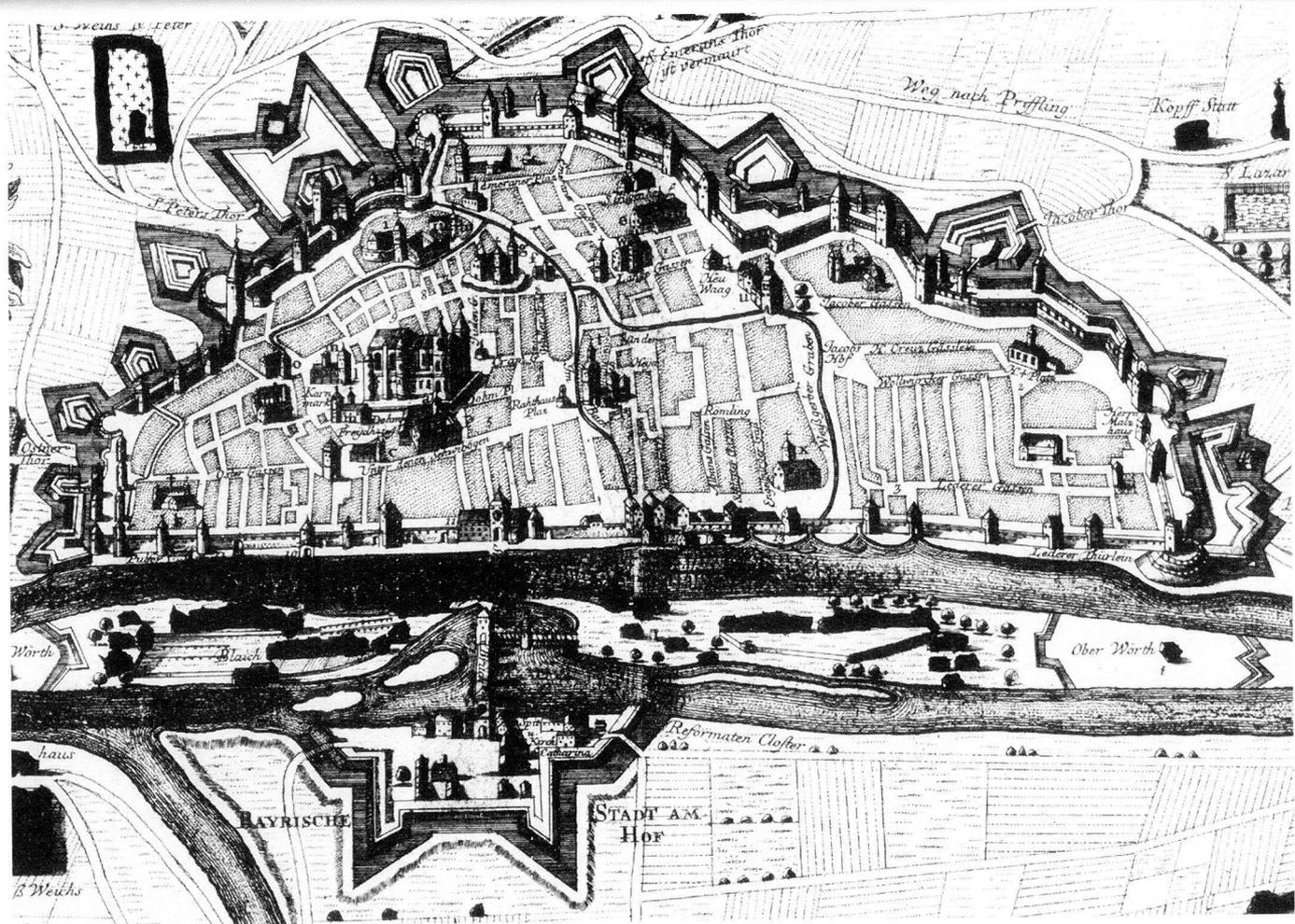
orientierten, zweidimensionalen Darstellung von Gebäuden sind pünktlich zum Jahrhundertwechsel durch die dritte Dimension bereichert worden. Die Möglichkeit einer virtuellen, dreidimensionalen Darstellung von Bauwerken, die sich zur Wende in das 21. Jahrhundert eröffnete, konnte auch für dieses Projekt genutzt werden. So wurde die neue Technologie der Bauwerkvermessung mit Hilfe eines rotierenden Laserscanners zur Erfassung der komplizierten und für den Besucher und Nutzer höchst unübersichtlichen Innenraumabfolge der porta praetoria eingesetzt. Durch die Schaffung des virtuellen Raummodells sind die räumlichen Bezüge der Innenräume in ihrer Komplexität und Positionierung innerhalb des Bischofshofes und des räumlichen Umfeldes fassbar und begreiflich geworden (Abb. 33, 34).

Die Bemühungen um die richtige Form der Dokumentation für die porta praetoria und die Aussagekraft der vorliegenden, aus unterschiedlichen Bereichen kommenden Ergebnisse veranschaulichen den komplementären Charakter der angewandten Methoden, von denen jede einzelne das Bauwerk nur in einem Teilbereich zu erfassen vermag. Das Zusammenwirken von architektonischen, bauhistorischen und naturwissenschaftlichen Kenntnissen hat uns die porta praetoria aber ein gutes Stück näher rücken lassen und die Probleme bei ihrer Erhaltung verdeutlicht.

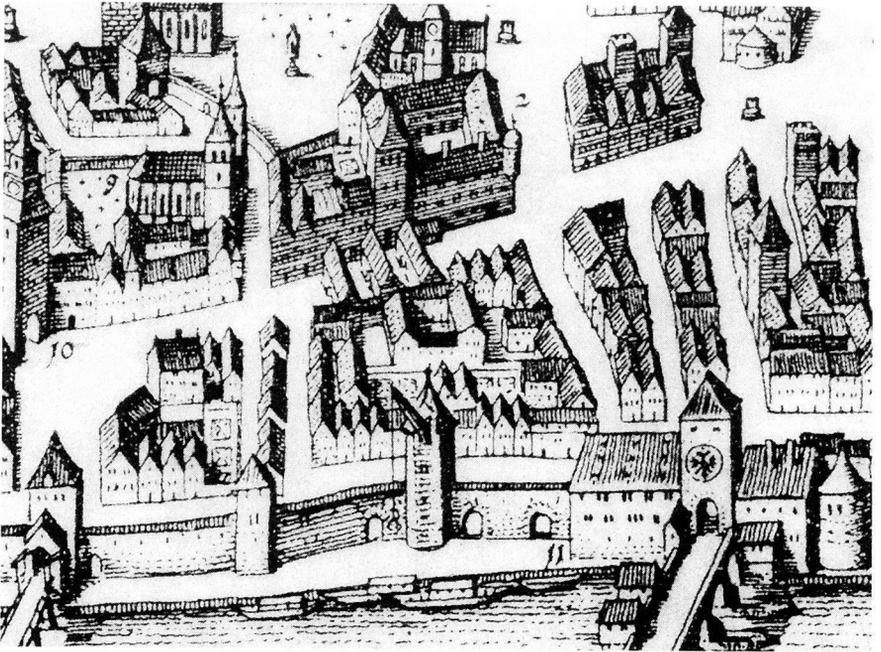
Nach der Auswertung des Archiv- und Bildmaterials und der Vermessung und Dokumentation der Oberflächen steht fest, dass sich die Mauerschale mit ihren groben Ausbrüchen und Fehlstellen über 120 Jahre nicht gravierend verändert hat<sup>38</sup>. Bedenklicher stimmt die rasante Veränderung der gestalteten Oberfläche, die sich wie ein roter Faden durch die Fotogeschichte des Objektes zieht. Nimmt man die Steinhaut unter die wissenschaftliche Lupe, so zeigen sich die Folgen einer Jahrzehnte währenden Umweltbelastung durch Luftschadstoffe und die Altlasten wiederholter Restaurierungen. Diese Folgen äußern sich in tückischen Formen der Zersetzung, die ihre Spuren bereits lange vor dem Sichtbarwerden von Schäden hinterlassen haben und in aller Regel einen für die originale Oberfläche nachteiligen, weil irreversiblen Verlauf zeigen. Und leider folgt der Korrosionsprozess auch nicht einem linearen Zeitgesetz, sondern verläuft häufig exponentiell. Das bedeutet, dass es nicht selten „kurz vor Zwölf“ oder gar zu spät ist, bis die Erkenntnis in das öffentliche Bewusstsein rückt. Dies ist im Denkmalschutz nicht anders als in der Umweltpolitik. Aus diesem Grund kann man nur hoffen, dass man sich der akuten Probleme an der porta praetoria annimmt, damit das römische Fragment nicht wieder eingebaut werden muss, um die kommenden Jahrhunderte zu überleben.

gensburg erfolgte zusätzlich eine fotografische Abwicklung der Innenräume, erstellt von Peter Ferstl, Stadt Regensburg.

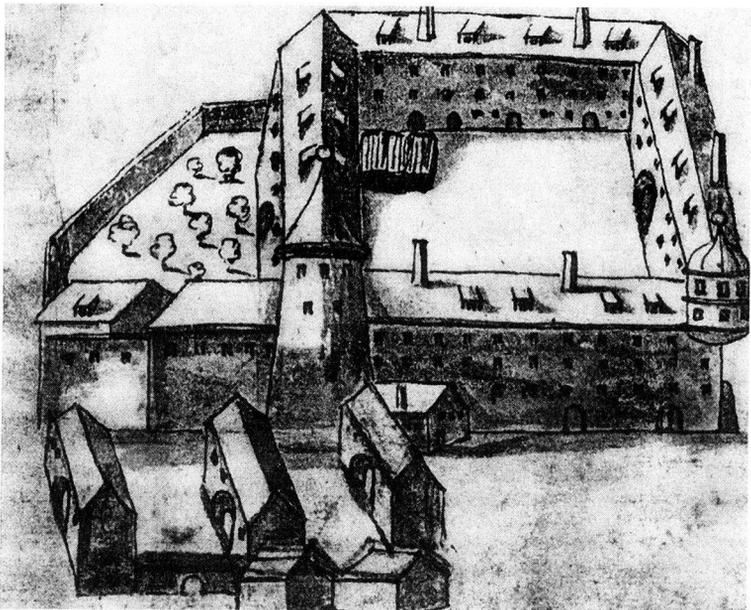
<sup>38</sup> Dies verdeutlicht eine vergleichende Betrachtung von Turmdetails aus den Jahre 1917 und 2000.



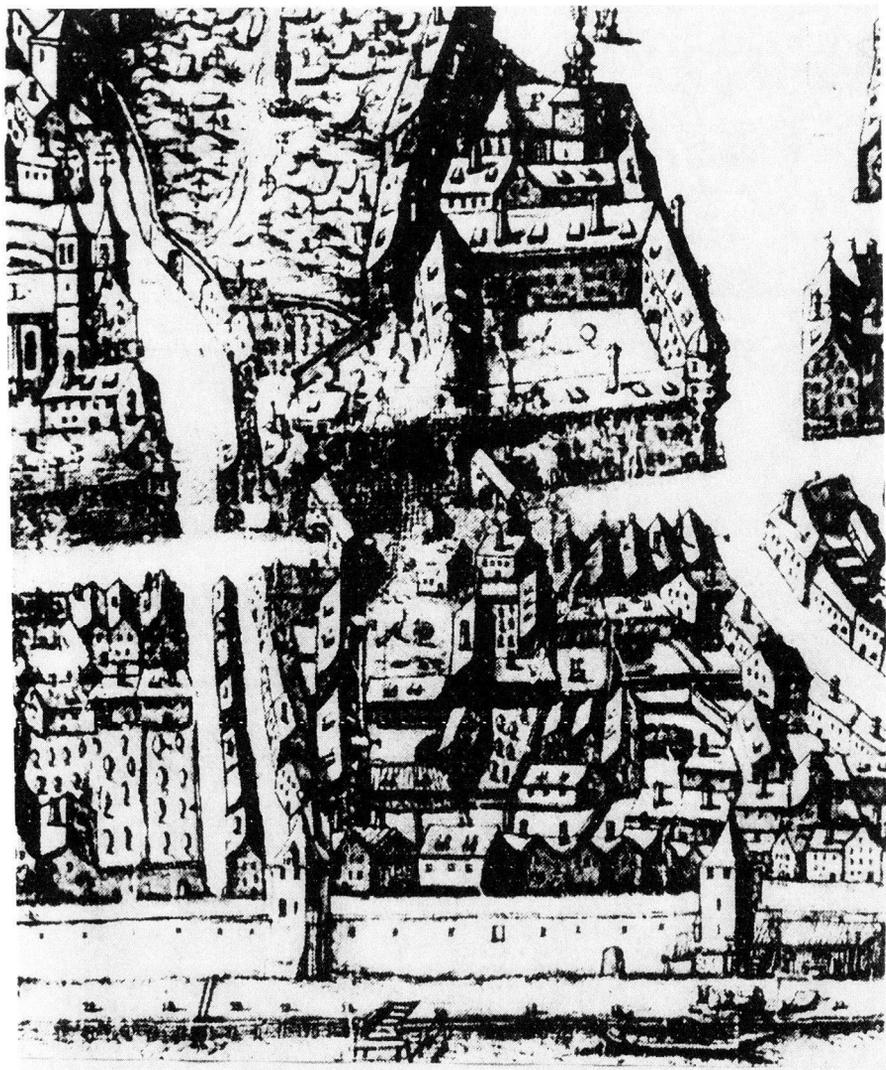
1: Stahlstich von 1662: Gesamtdarstellung der Stadt Regensburg mit Stadtmauer und wichtigen Gebäuden (Luftbildarchiv Stadt Regensburg).



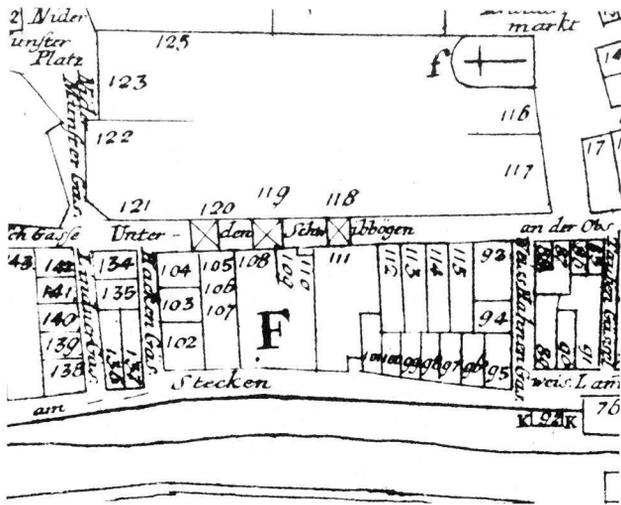
2: Stadtsicht von 1646 von Merian: Ausschnitt mit Abbildung der Innenstadt und der nördlichen Stadtmauer mit dem Tor im Brückenturm und dem Kränchertor (Historisches Museum der Stadt Regensburg).



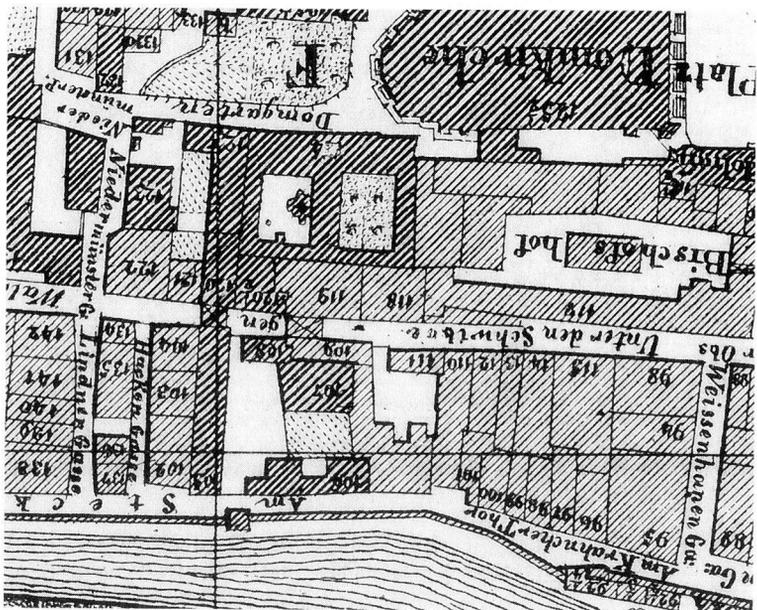
3: Federzeichnung von 1651 aus der Schratzsammlung: Darstellung des Bischofshofes und der Schwibbögen (Museum Fürst Thurn und Taxis).



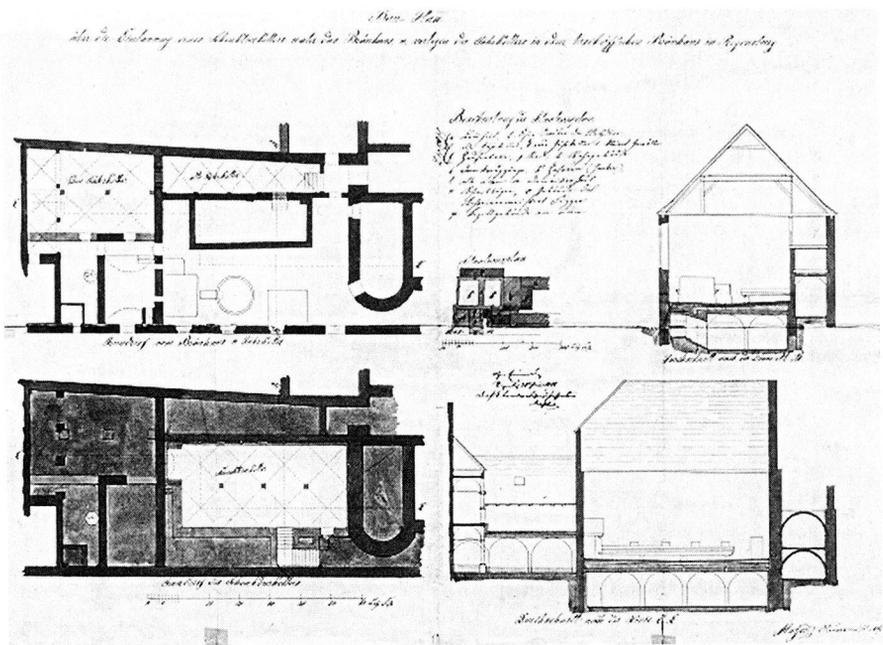
4: Federzeichnung von 1644 (Stand 1614) von H.G. Bahre: Ausschnitt mit der Abbildung des Bischofshofes (Museum Fürst Thurn und Taxis).



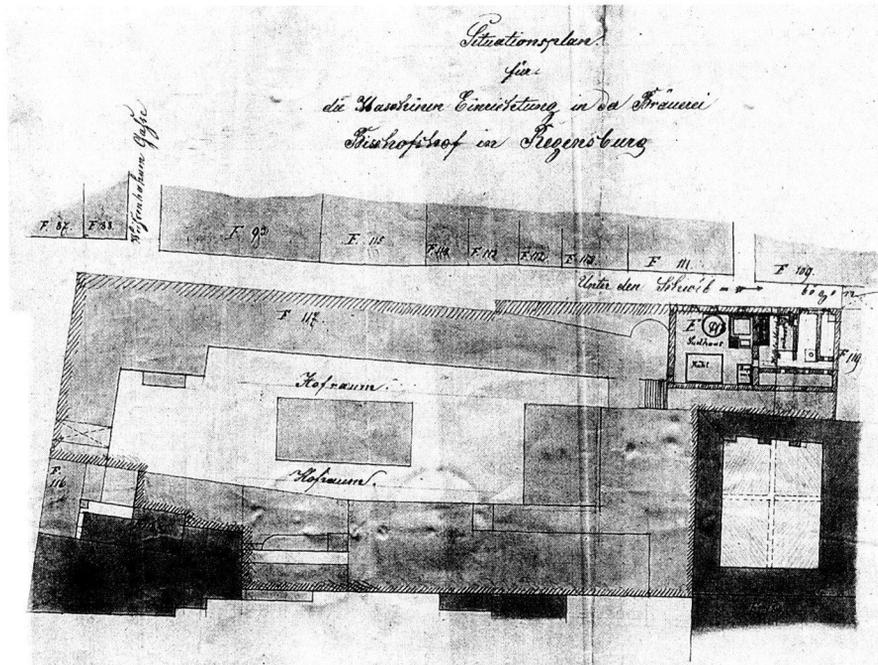
5: Katasterplan der Stadt Regensburg von 1808: Ausschnitt mit der Abbildung des Bischofshofes (Luftbildarchiv Regensburg).



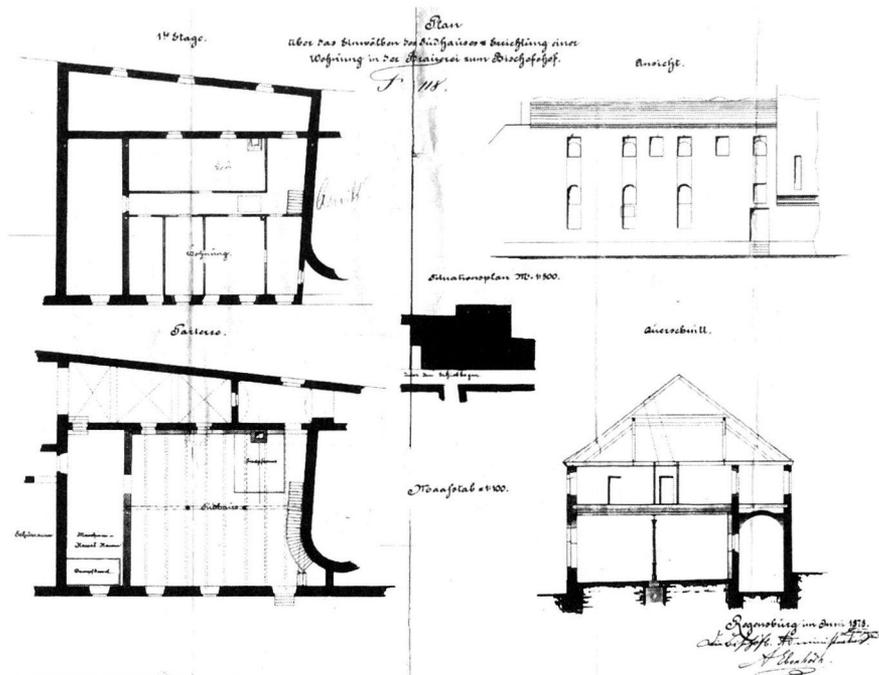
6: Katasterplan der Stadt Regensburg von 1812: Ausschnitt mit der Abbildung des Bischofshofes und mit nur zwei Schwibbögen (Luftbildarchiv Regensburg).



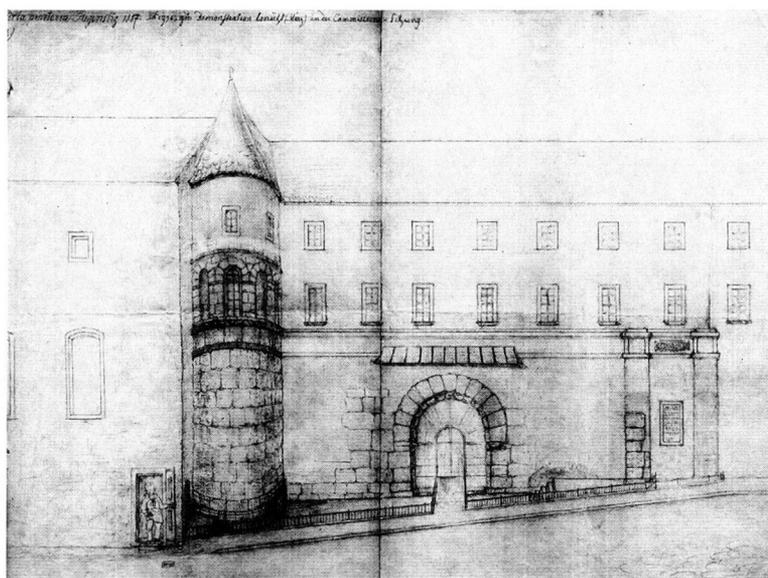
7: Aquarellierter Umbauplan von 1858: „Bauplan über die Einbauung eines Schenkbräuellers unter das Bräuhaus und Verlegen des Gährkellers in das Bischöfliche Bräuhaus in Regensburg“ (Stadtarchiv Regensburg).



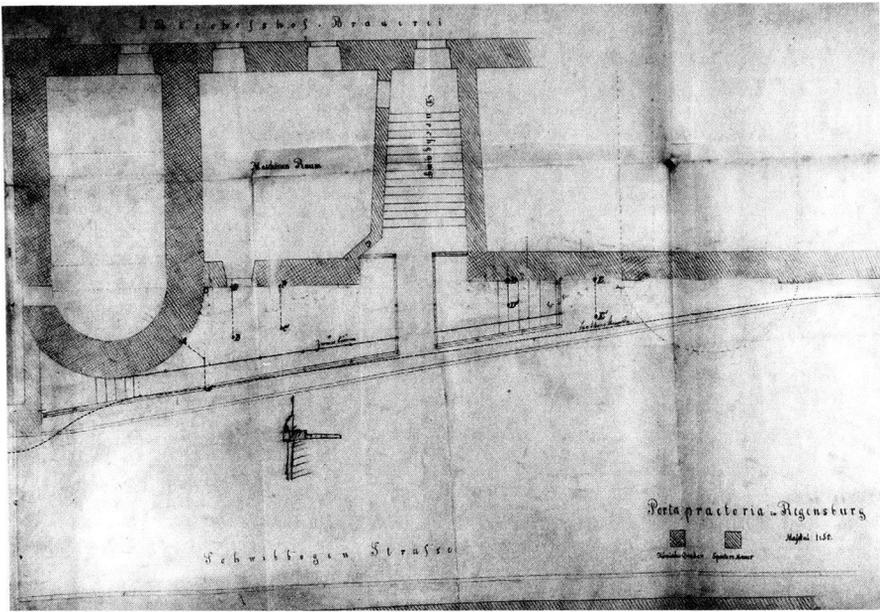
8: Ausschnitt aus dem Maschineneinrichtungsplan von 1865: „Situationsplan für die Maschinen-Einrichtung in der Brauerei Bischofshof in Regensburg“ (Stadtarchiv Regensburg).



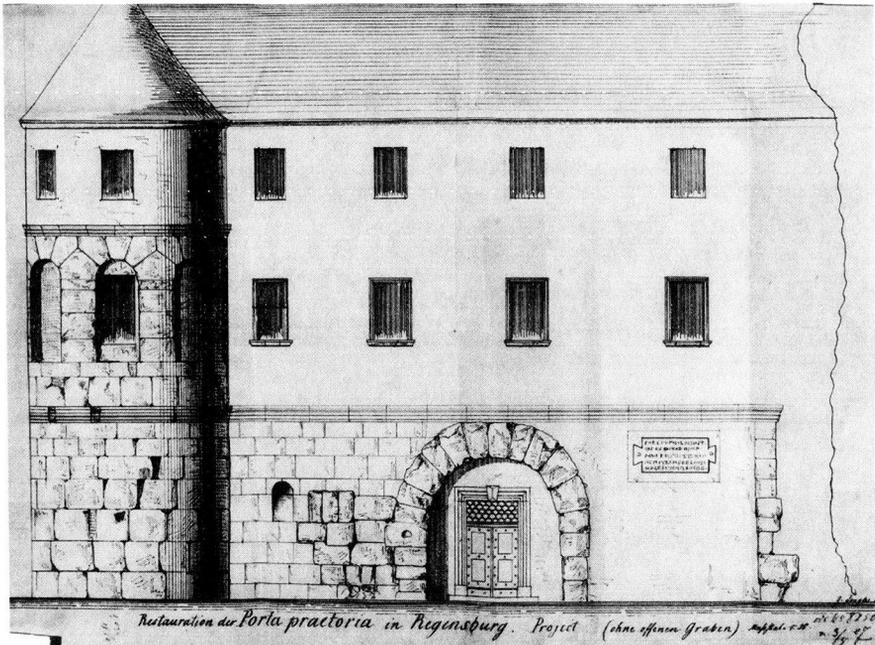
9: Aquarellierter Plan zum Umbau des Sudhauses von 1878, der als Bauantrag eingereicht wurde: „Plan über das Einwölben des Sudhauses und das Errichten einer Wohnung in der Brauerei zum Bischofshof“ (Stadtarchiv Regensburg).



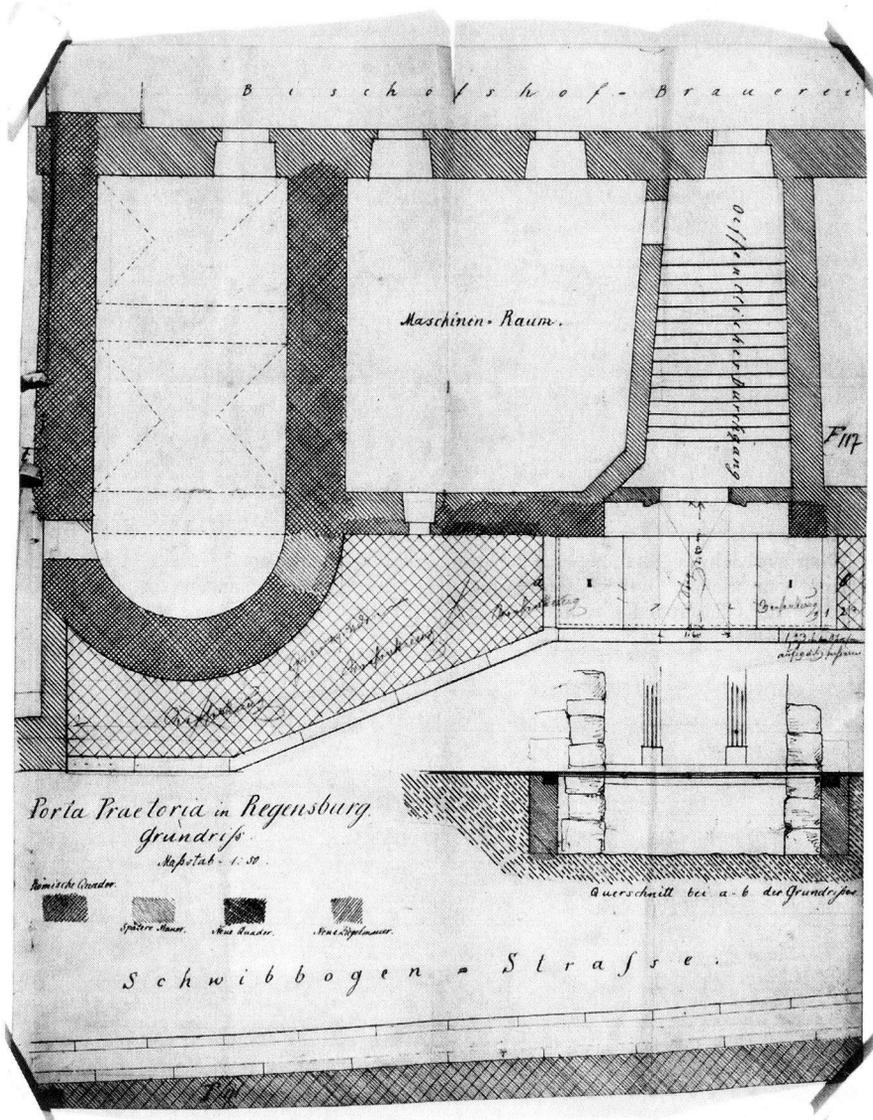
10: Skizze zur „Demonstration in der Commissions Sitzung“ zur Freilegung der porta praetoria vom März 1887 in der Ansicht von Norden und „mit offenen Graben“ von Pfarrer Joseph Dahlem im Maßstab 1:50 (Stadtarchiv Regensburg).



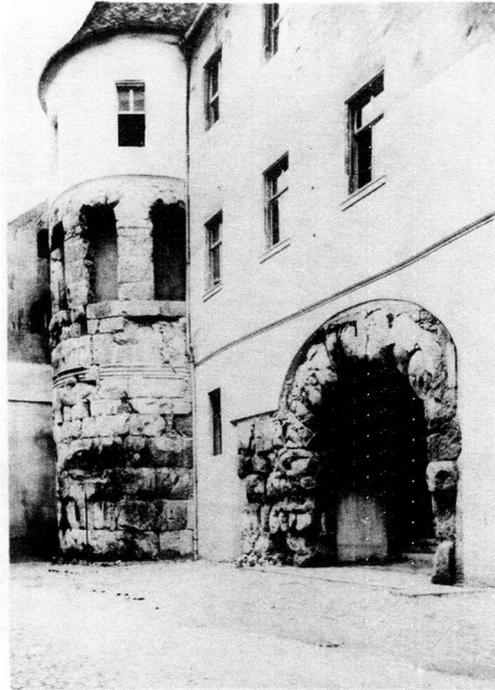
11: Plan zur Gehweggestaltung der porta praetoria von 1887 im Zuge der Freilegung als Variante „mit offenem Graben“. Grundriss mit Details zum Treppenzugang des Grabens und der Überbrückung zum Tor im Maßstab 1: 50 (Stadtarchiv Regensburg).



12: Plan zur „Restauration“ der porta praetoria vom Mai 1887 im Zuge der Freilegung in der Ansicht von Norden und „ohne offenen Graben“ von Domykar G. Dengler im Maßstab 1:50 (Stadtarchiv Regensburg).

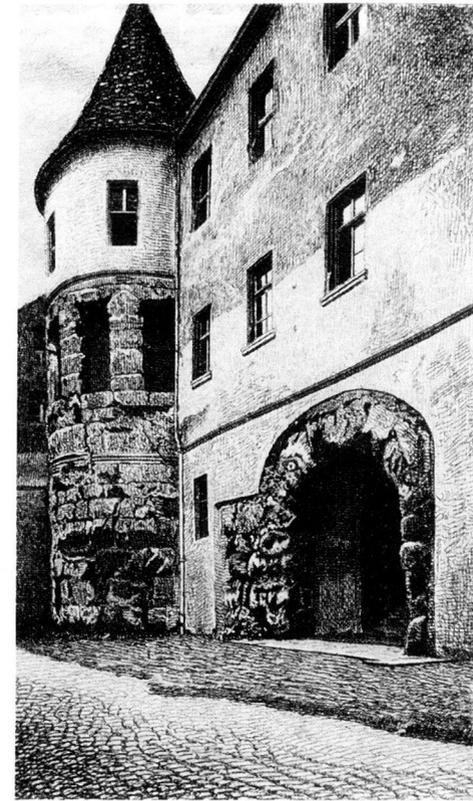


15: Plan zur Gehweggestaltung der porta praetoria von 1887 im Zuge der Freilegung, als Grundriss mit Detail des Schachtes („ohne offenen Graben“) im Querschnitt und im Maßstab 1: 50 (Stadtarchiv Regensburg).

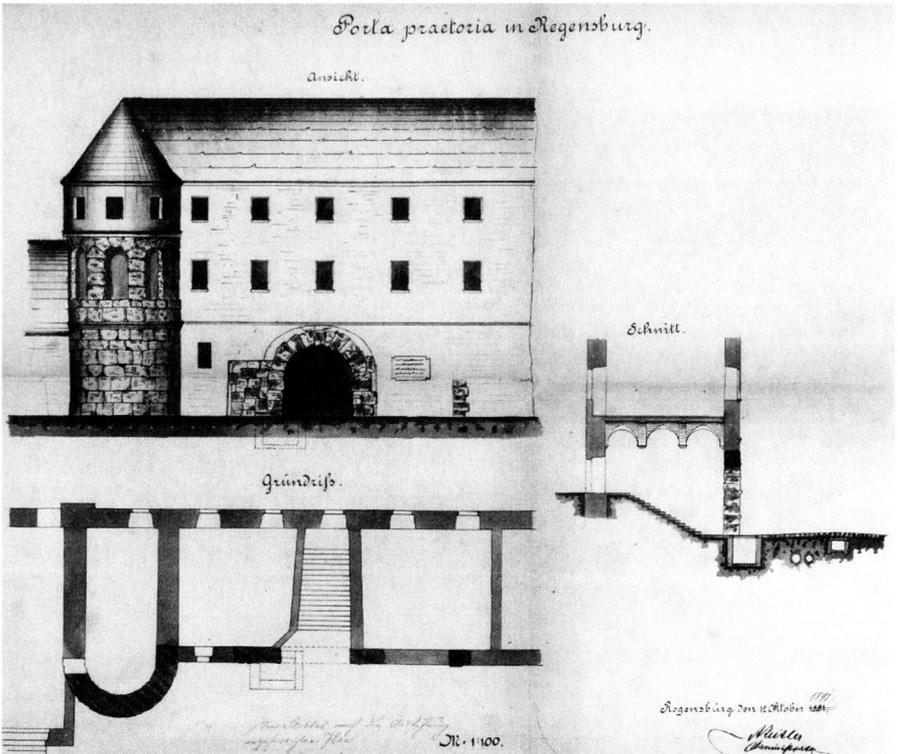


14: SW-Fotografie um 1888: Der königlich bayerische Hofphotograph Johann Laifle nimmt die porta praetoria von der Nordwestseite mit dahinterliegendem Sudhaus auf (Stadtbildstelle Regensburg).

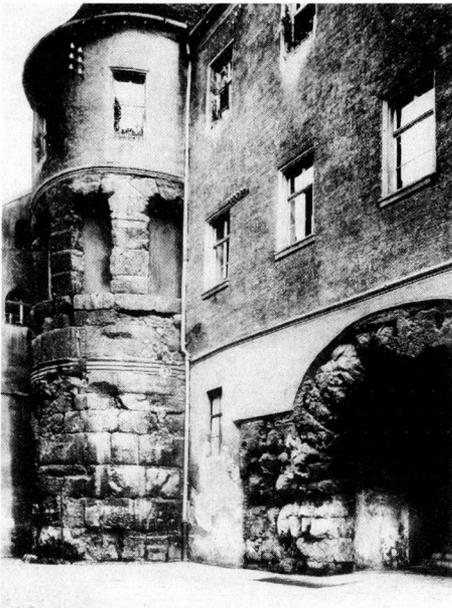
35



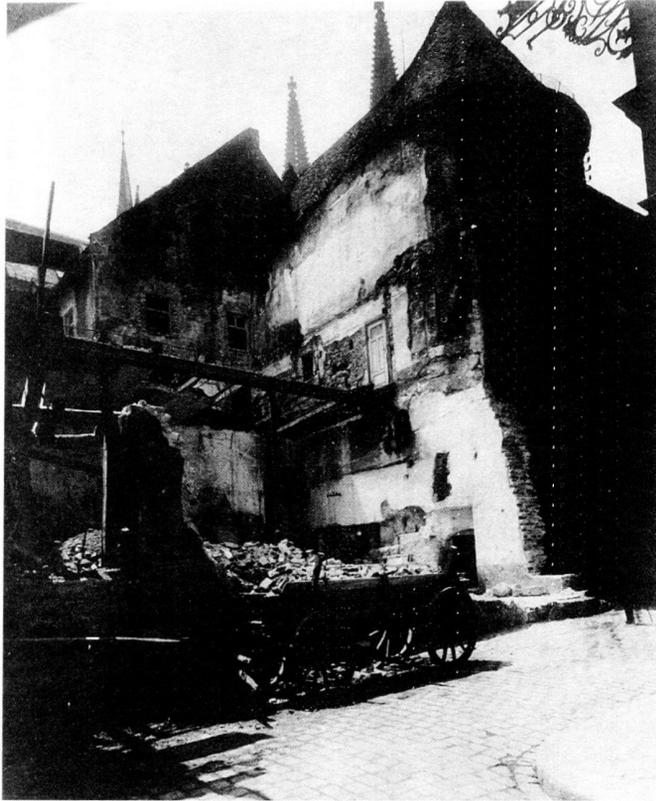
15: Federzeichnung nach der Fotografie von Joh. Laifle um 1888: Die unbefestigte Straßensituation vor dem Torbogen mit den darunter liegenden Stahlplatten wird deutlich hervorgehoben, wie auch die andersartige, wellig angelegte Putzstruktur der oberen Fassadenhälfte (Museum Fürst Thurn und Taxis).



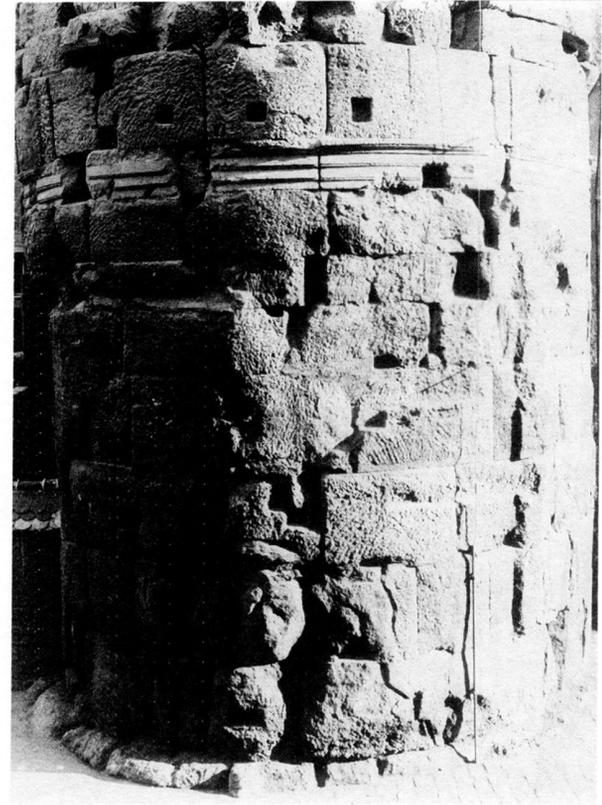
16: Aquarellierter Plan von 1891: Dokumentation der durchgeführten Freilegung als Ansichts-, Grundriss- und Schnittzeichnung, wobei insbesondere die als Schacht konzipierte Tiefausgrabung illustriert wird (Stadtarchiv Regensburg).



17: SW-Fotografie vor 1910: Nordwestansicht der porta praetoria mit Sudhaus im Hintergrund. An den Putzfassaden wurden bereits Isolatoren für die Stromversorgung angebracht (Stadtbildstelle Regensburg).



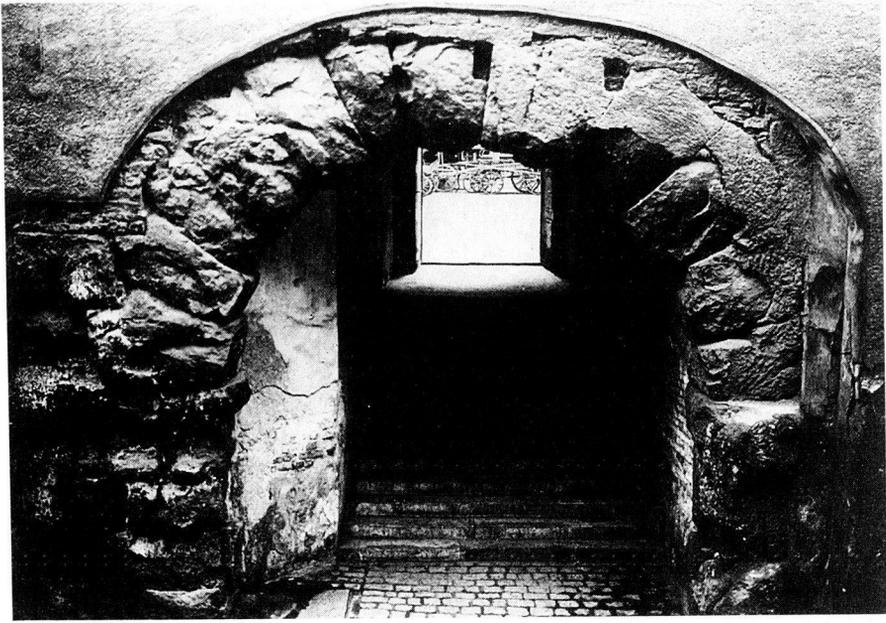
18: SW-Fotografie von 1910 während des Sudhausabbruches: Die in den Plänen zum Sudhausumbau verzeichnete Eisenkonstruktion wird erkennbar, sowie die massive Ziegelmauer, die in Angrenzung an die Turm-ostseite den westlichen Abschluss bildete (Städtische Lichtbildstelle).



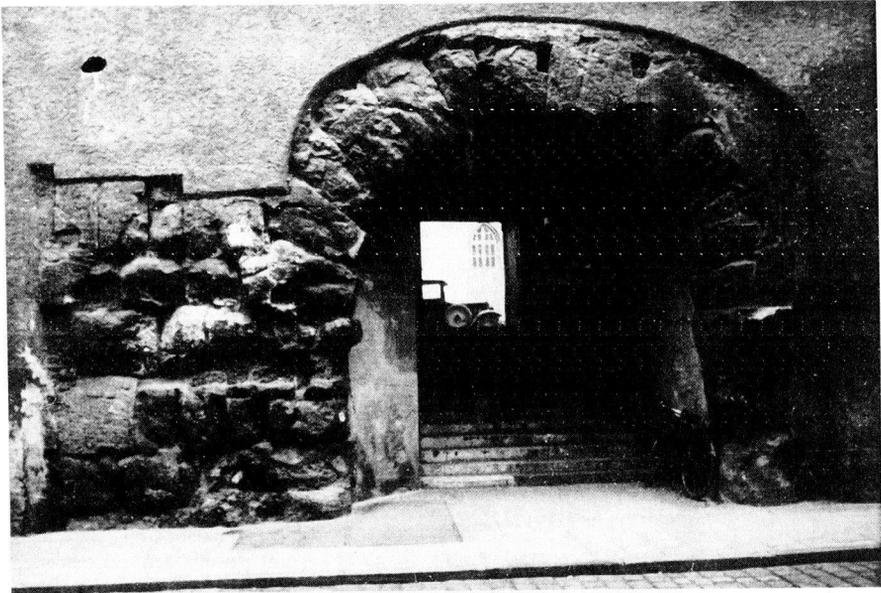
19: SW-Fotografie von 1917: Erste Detailaufnahme auf das Untergeschoss des Turmes mit bautechnischen Details wie Balken- und Treppenaufleger (Stadtbildstelle Regensburg).



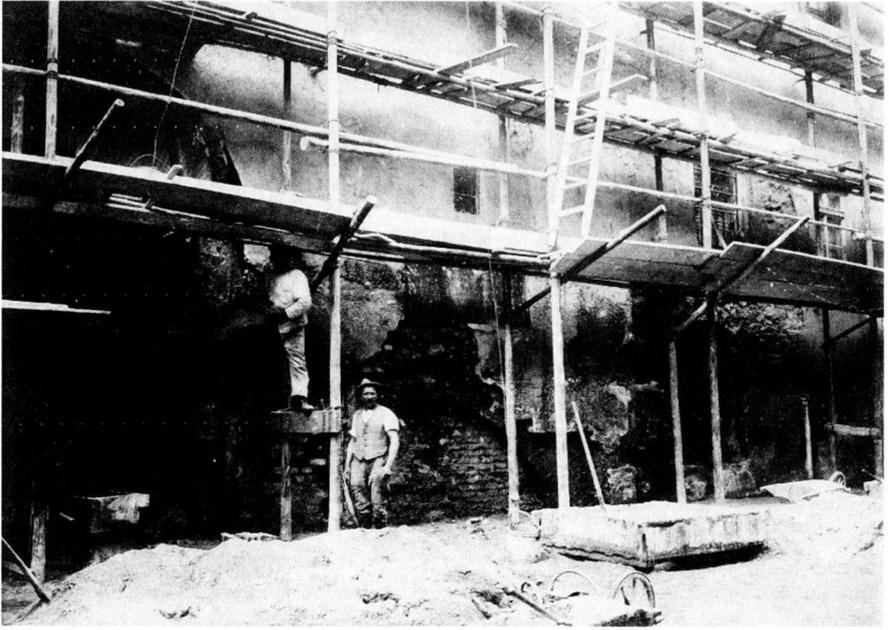
20: SW-Fotografie um 1924/1925: Die Putzfassade des Bischofshofes befindet sich in einem katastrophalen Zustand (Stadtbildstelle Regensburg).



21: SW-Fotografie um 1926: Blick durch den Torbogen in den Bischofshof, wo eine Kutsche abgestellt wurde. Die Putzgrenze entspricht der vor der Sanierungsmaßnahme von 1927 (Stadtbildstelle Regensburg).



22: SW-Fotografie nach 1927: Blick durch den Torbogen in den Bischofshof, wo ein Automobil geparkt wurde. Außerdem ist die neue Putzgrenze um den Torbogen zu sehen (Stadtbildstelle Regensburg).

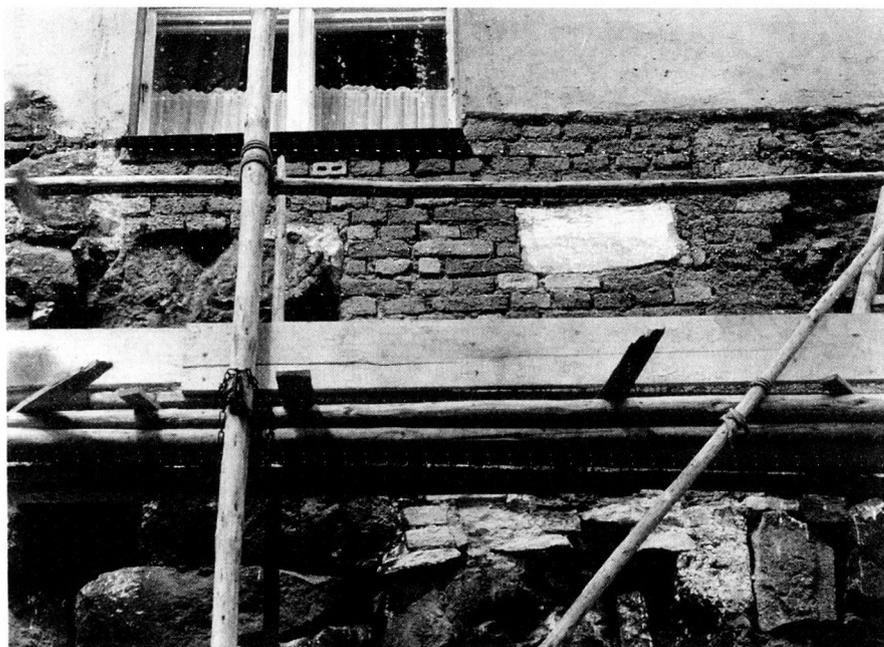


23: SW-Fotografie von 1927: Baustellenaufnahme vor dem Torbogen während der Sanierungsmaßnahme. Eingerüstete Bischofshoffassade mit großzügig abgeschlagenem Putz im unteren Bereich des Ziegelmauerwerks (Stadtbildstelle Regensburg).

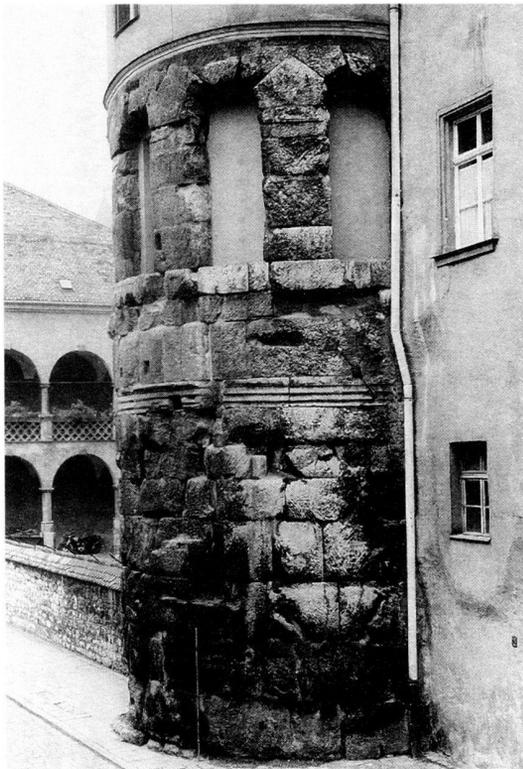


24: SW-Fotografie von 1941: Nordostansicht auf die porta praetoria und den Bischofshof mit angrenzendem Straßenzug „Unter den Schwibbögen“. Auf dem Gehsteig wurde eine Straßenbeleuchtung installiert und jenseits der Gartenmauer, im Römerhof, Bäume gepflanzt (Presse- und Informationsstelle Regensburg).

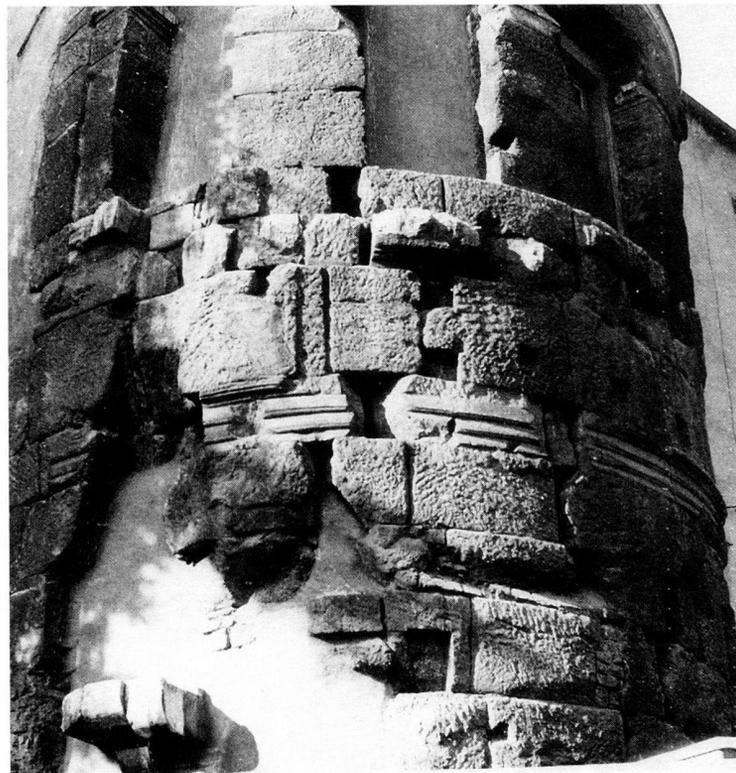
25: SW-Fotografie um 1958, vor der Sanierung: Blick von Nordosten auf die porta praetoria. Unter den Fenstergesimsen an der Ostwand ist eine Anputzung zu sehen, auf der das Römermauerwerk als Ritzung optisch ergänzt wurde. Insgesamt vermittelt das Mauerwerk einen gleichmäßig dunklen Eindruck (BLFD).



26: SW-Fotografie September 1958, während der Sanierung: Detail aus der eingerüsteten Ostwand mit abgeschlagenem Putz, der die ehemalige obere Putzkante unter dem Fenstergesims erkennen lässt, bis zu welcher der ehemalige Ergänzungsputz mit der Mauerwerk imitierenden Ritzung reichte (BLFD).



27: SW-Fotografie um 1958, nach der Sanierung: Nordwestansicht des Turmunter- und obergeschosses mit deutlich verschwärzten und aufgehellten Zonen (BLFD).

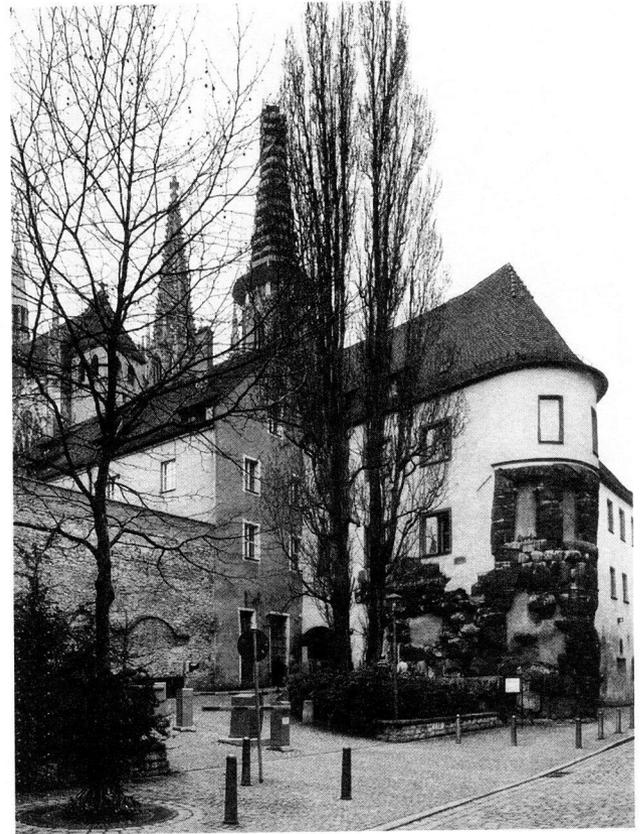


28: SW-Fotografie von 1971: Nordostansicht des Turmes mit bautechnischen Details wie dem Kaminzug mit abschließendem Kragstein (li. unten) und Eisenanker (re. oben); (BLFD).

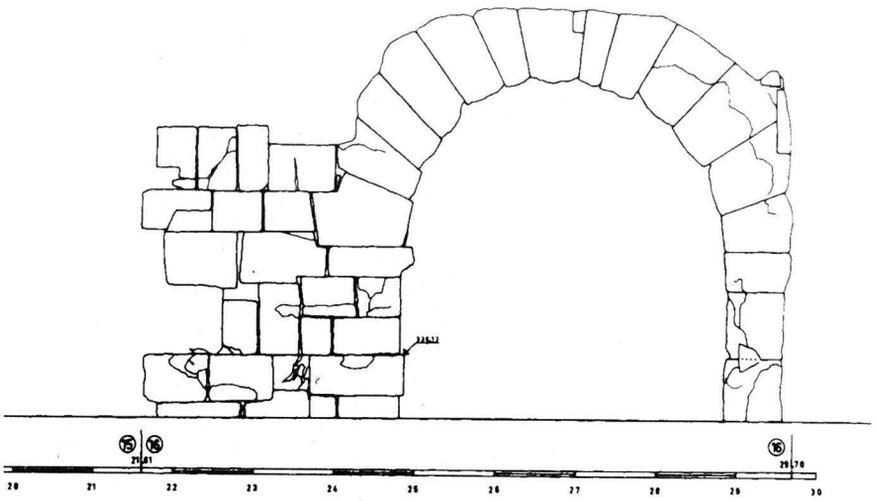


45

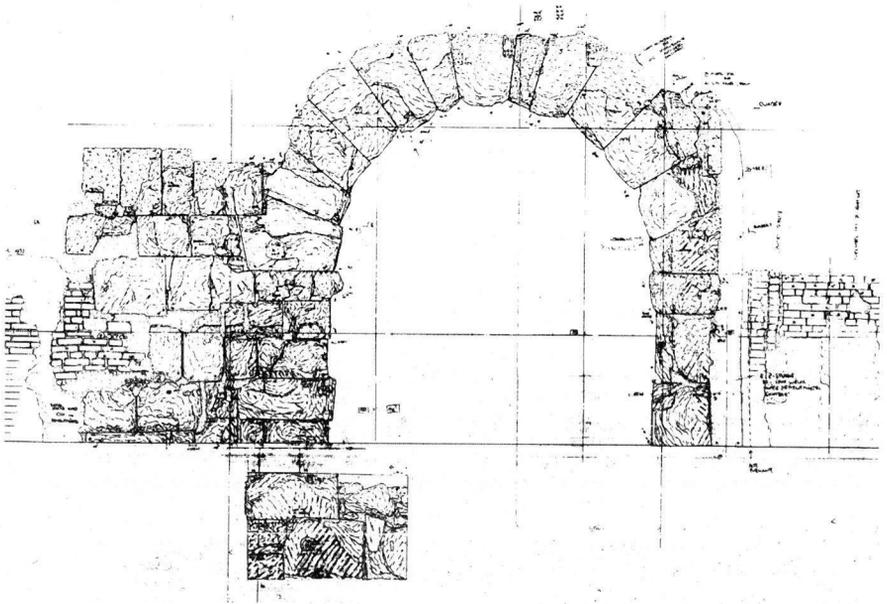
29: SW-Fotografie von 2000: Nordansicht aller Turmgeschosse (Uwe Gaasch).



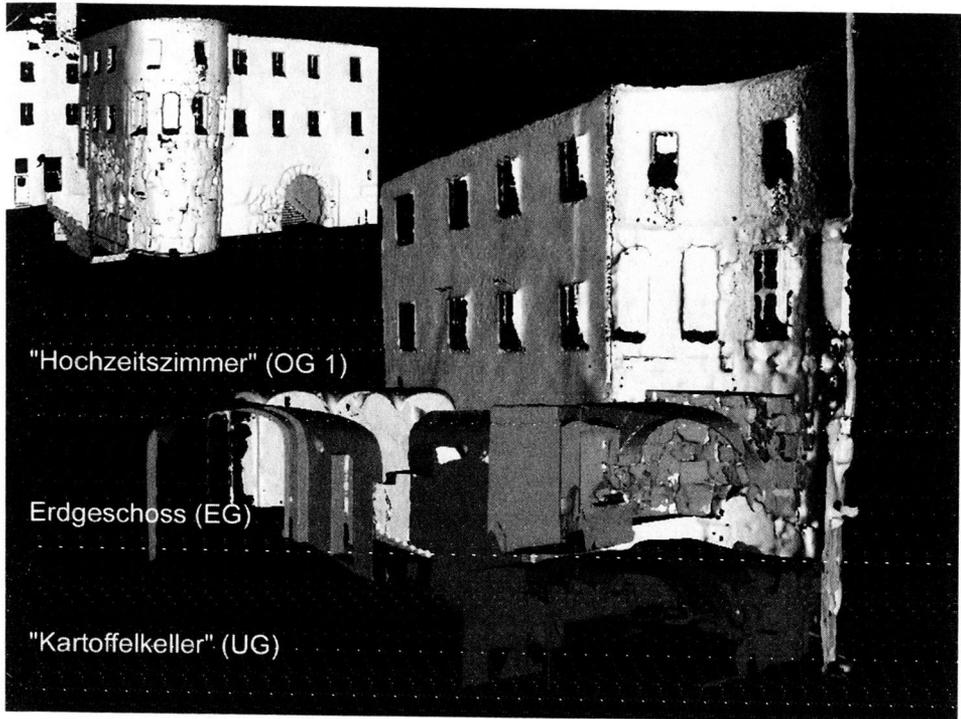
30: SW-Fotografie von 1995: Blick von Nordosten auf die porta praetoria und den „Römerhof“ (Presse- und Informationsstelle Regensburg).



31: Photogrammetrische Aufnahme des Tores (Nordansicht) von 1966 (Architekt Westphal).



32: Verformungsgerechtes Aufmaß des Tores (Nordansicht) von 2001 (Thomas Aumüller).

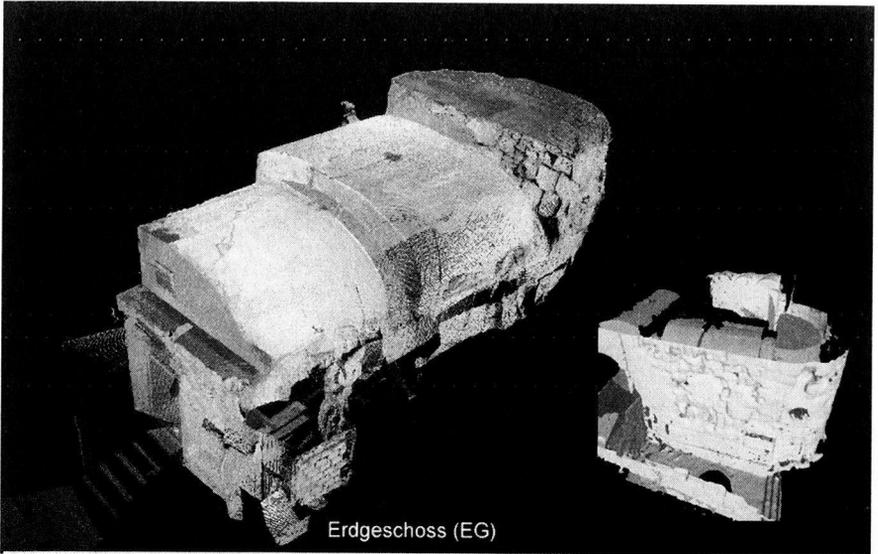


"Hochzeitszimmer" (OG 1)

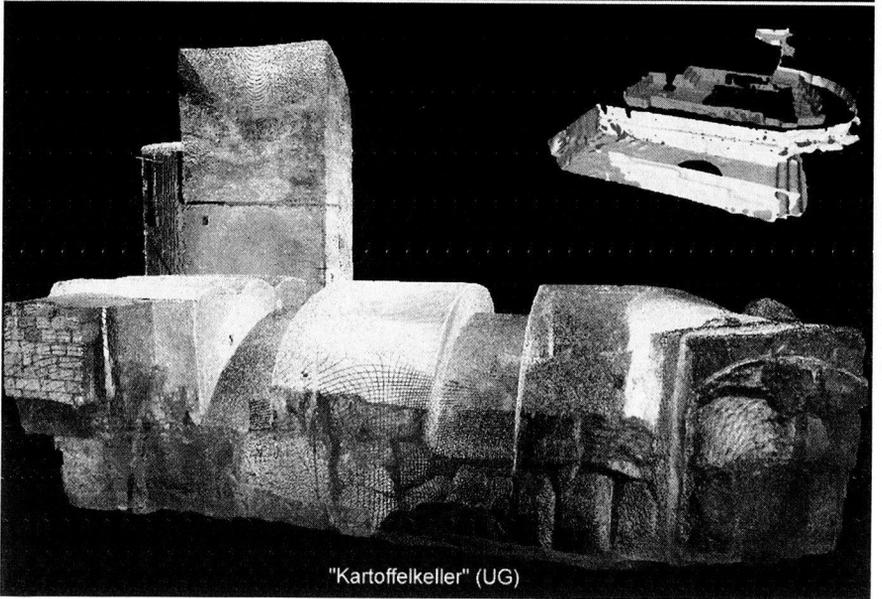
Erdgeschoss (EG)

"Kartoffelkeller" (UG)

33: 3D-Aufnahme mit Laserscanner: Schnitt durch das Erdgeschoss und den „Kartoffelkeller“ der porta.



Erdgeschoss (EG)



"Kartoffelkeller" (UG)

34: 3D-Aufnahme mit Laserscanner: Raummodelle vom Erdgeschoss und dem „Kartoffelkeller“ der porta praetoria.

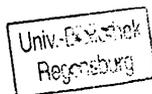
# ANHANG Teil A Auswertung der Plan- und Bildunterlagen

## Anhang 1: Verzeichnis des bearbeiteten Bildmaterials mit Archiv- und Signaturzuordnung:

Zeit	Thema	Bereich	Darst.art	Archiv	Signatur
1644	Stadtansicht in Vogelperspektive mit Donauufer	Stadtansicht von N	künstl. D.	HMR	HV 1258
1644	Stadtansicht in Vogelperspektive mit Bischofsh.	Stadt v. N (Ausschnitt)	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.083a
1646	Stadtansicht in Vogelperspektive, Stadtmauer	Stadt v. N (Ausschnitt)	künstl. D.	HMR	G 1980/ 325.28
1646	Stadtansicht in Vogelperspektive mit Bischofsh.	Stadt v. N (Ausschnitt)	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.081
1646	Stadtansicht in Vogelperspektive mit Bischofsh.	Stadt v. N (Ausschnitt)	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.082
1651	Stadtansicht in Vogelperspektive mit Bischofsh.	Stadt v. N (Ausschnitt)	künstl. D.	MFTT	Samm. Schratz
1662	Stadtansicht in Vogelper-/Grundriss, Stadtmauer	Stadt v. N (Ausschnitt)	künstl. D.	LbA	1662 (dat.)
1808	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	1808 (dat.)
1812	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	1812 (dat.)
1812	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	1812a (dat.)
1858	Plan - Sudhausumbau: Schenkkbierkellers	Sudh., EG, UG, Grundriss	Plan	StA	Bischofshof
1865	Plan - Sudhausumbau: Maschineneinrichtung	Sudh., EG, Grundriss	Plan	StA	AK 19 Jahr 84
1870	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	1870 (dat.)
1870	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	1870a (dat.)
1878	Plan - Sudhausumbau: Errichten einer Wohnung	Sudh., EG, OG, Grundriss	Plan	StA	AK 19 Jahr 84
1878	Plan - Sudhausumbau: Reserve Kessel	Sudh., EG, Grundriss	Plan	StA	AK 19 Jahr 84
1880	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	1880 (dat.)
1886	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP von N mit Sudhaus	Plan	StB	9453-14
1886	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP von N mit Sudhaus	Plan	StA	ZR I 5446
1886	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP im Grundriss	Plan	StB	9453-9
1886	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP im Grundriss	Plan	StA	ZR I 5446 P
1886	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP im Grundriss	Plan	StA	ZR I 5446
1887	Vermauerter Tordurchgang	Tor von NW	Fotogr.	StB	4633- 82/ 1908
1887	Plan - Sudhausumbau: Doppelsudwerksanlage	Sudh., EG, Grundriss	Plan	StA	1887 Doppelsudw.
1887	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP von N, Ansicht	Plan	StB	9455-4
1887	Plan - PP- Freilegung:"ohne offenen Graben"	PP von N, Ansicht	Plan	StA	ZR I 5446 P
1887	Plan - PP- Freilegung:"ohne offenen Graben"	PP im Grundriss	Plan	StB	9455-5
1887	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP im Grundriss	Plan	StA	ZR I 5446 P
1887	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP von N, Ansicht	Plan	StB	9482-2
1887	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP von N, Ansicht	Plan	StA	ZR I 5446 P
1887	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP im Grundriss	Plan	StB	9454-14
1887	Plan - PP- Freilegung:"mit offenem Graben"	PP im Grundriss	Plan	StA	ZR I 5446 P
1887	Plan - PP- Freilegung: "mit offenem Graben"	Tor, Querschn.v. O	Plan	StB	9454-16
1887	Plan - PP- Freilegung: "mit offenem Graben"	Tor, Querschn.v. O	Plan	StA	ZR I 5446 P
1887	Plan - PP- Freilegung: "mit offenem Graben ?"	Tor, Querschn.v. O	Plan	StB	9454-11
1887	Plan - PP- Freilegung: "mit offenem Graben ?"	Tor, Querschn.v. O	Plan	StA	ZR I 5446 P
1888	Kurze Zeit nach der Freilegung	PP von NW	Postk.	StB	9457-84
1888	Kurze Zeit nach der Freilegung	PP von NW	Druck	MFTT	TT.Rat.XI.092
1888	Kurze Zeit nach der Freilegung	PP von NW	künstl. D.	StB	11626-9
1890	Vor Sudhausabriss -Bildserie	PP von NW	Fotogr.	MFTT	TT.Rat.XI.86
1890	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	1890 (dat.)
1891	Plan - PP- Durchgeführte Restaurierung B	PP von N, Ansicht	Plan	StB	9455-12
1891	Plan - PP- Durchgeführte Restaurierung B	PP von N, Ansicht	Plan	StA	ZR I 5446 P
1891	Plan - PP- Durchgeführte Restaurierung A	PP von N, Ansicht	Plan	StB	9455-18
1891	Plan - PP- Durchgeführte Restaurierung A	PP von N, Ansicht	Plan	StA	ZR I 5446 P
1899	Vor Sudhausabriss -Vor Sanierung	PP von NO	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.096
1900	Vor Sudhausabriss -Bildserie	PP von NW	Postk.	MFTT	TT.Rat.XI.087
1900	Vor Sudhausabriss -Bildserie	PP von NW	Fotogr.	StB	4633-74
1900	Vor Sudhausabriss -Bildserie	PP von NW	Fotogr.	StB	4659-42
1900	Vor Sudhausabriss -Bildserie	PP von NW	Fotogr.	StB	4659-50

Zeit	Thema	Bereich	Darst.art	Archiv	Signatur
1900	Vor Sudhausabriss -Bildserie	PP von NW	Postk.	MFTT	TT.Rat.XI.097
1900	Vor Sudhausabriss -Bildserie	PP von NW	Fotogr.	StB	4659-70
1900	Vor Sudhausabriss, Vor Sanierung	PP von NW	Postk.	StB	9820- 33
1900	Vor Sudhausabriss, Vor Sanierung	PP von NW	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.101b
1900	Vor Sudhausabriss, Vor Sanierung	PP von NW	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.101e
1910	Vor Sudhausabriss, Nach Sanierung	PP von NW	Fotogr.	StB	13563-10
1910	Vor Sudhausabriss, Nach Sanierung	PP von NW	Fotogr.	StB	4859-66b
1910	Vor Sudhausabriss, Gerüst f. Sudhausabriss	PP von NW	Fotogr.	StB	4659- 52
1910	Sudhausabriss	PP von NO	Fotogr.	StB	4631- 59
1910	Sudhausabriss	PP von NO	Fotogr.	StB	4631- 61
1910	Sudhausabriss	PP von NO	Fotogr.	StB	4631- 61b
1910	Nach Sudhausabriss	PP von NW	Fotogr.	StB	11203-05
1910	Nach Sudhausabriss	PP von NW	Fotogr.	StB	11234-1
1910	Nach Sudhausabriss	PP von NW	Fotogr.	MFTT	TT.Rat.XI.098
1910	Nach Sudhausabriss	PP von NW	Fotogr.	MFTT	TT.Rat.XI.100
1910	Nach Sudhausabriss, Holzzaun (Römerh.)	PP von NW	Fotogr.	StB	4631-57
1910	Nach Sudhausabriss, Holzzaun (Römerh.)	PP von NW	Postk.	StB	7723-10
1910	Nach Sudhausabriss, Holzzaun (Römerh.)	PP von NW	Postk.	MFTT	TT.Rat.XI.088,
1910	Nach Sudhausabriss	PP von NO	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.099
1913	Nach Sudhausabriss, Gartenmauer (Römerh.)	PP von NW	Fotogr.	StB	4659-46
1913	Plan - Gartenmauer, Ansicht von N, u. Grundriss	PP im Grundriss	Plan	StA	Bischofshof
1917	Turmuntergeschoss, Mauerwerk	Turm, UG, von N	Fotogr.	StB	4659-60
1917	Turmobergeschoss, Mauerwerk	Turm, OG, von N	Fotogr.	StB	4659-58
1917	Turmobergeschoss, Mauerwerk	Turm, OG, von N	Fotogr.	StB	4659- 80
1924	Nach Sudhausabriss, Gartenmauer (Römerh.)	PP von NO	Postk.	MFTT	TT.Rat.XI.089
1924	Nach Sudhausabriss, Gartenmauer (Römerh.)	PP von NO	Fotogr.	StB	4659-38
1924	Nach Sudhausabriss, Gartenmauer (Römerh.)	PP von NO	Fotogr.	StB	12367-08
1924	Turmobergeschoss, Mauerwerk, von NW	Turm, OG, von NW	Fotogr.	StB	4659- 06
1924	Turmobergeschoss, Mauerwerk, von W	Turm, OG, von W	Fotogr.	StB	4659- 04
1925	Vor Sanierung 1927	PP von NO	Illustr.	MFTT	TT.Rat.XI.091
1925	Vor Sanierung 1927	PP von NW	Fotogr.	StB	4659-34
1925	Nach Sudhausabriss	PP von NO	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.093
1925	Nach Sudhausabriss	PP von NO	künstl. D.	MFTT	TT.Rat.XI.094
1926	Vor Sanierung 1927	Tor von N	Fotogr.	StB	4659-08
1926	Vor Sanierung 1927	Tor von N	Fotogr.	StB	4659-8
1927	Sanierung um 1927	Tor mit Gerüst	Fotogr.	StB	4633-80
1927	Nach Sanierung 1927	Tor von N	Fotogr.	StB	4633- 76
1927	Nach Sanierung 1927	Tor von N	Fotogr.	StB	4633- 78
1927	Nach Sanierung 1927	Tor von N	Fotogr.	StB	4659-74
1927	Nach Sanierung 1927	Ostwand	Fotogr.	StB	4659- 56
1927	Nach Sanierung 1927	Ostwand	Fotogr.	StB	4659-72
1927	Nach Sanierung 1927	PP von NO	Fotogr.	StB	4659-40
1927	Nach Sanierung 1927	PP von NO	Fotogr.	StB	4649- 32
1927	Nach Sanierung 1927 (Auto im Hintergr.)	Tor von N	Fotogr.	StB	4659- 10
1927	Nach Sanierung 1927 (N-Wand verschattet)	PP von NO	Fotogr.	StB	4659-62
1927	Nach Sanierung 1927	PP von NW	Postk.	MFTT	TT.Rat.XI.101d (1)
1927	Nach Sanierung 1927	PP von NW	Postk.	MFTT	TT.Rat.XI.101d (2)
1930	Plan - Bischofshof, Fassadensanierung	Ansicht v. N, W, O	Plan	StA	Bischofshof
1930	Plan - Bischofshof, Fassadensanierung	Grundriss, EG	Plan	StA	Bischofshof
1930	Plan - Bischofshof, Fassadensanierung	Grundriss, OG	Plan	StA	Bischofshof
1935	1930er Jahre	PP von NO	Druck	MFTT	TT.Rat.XI.101d
1935	1930er Jahre (Schwibbogenstraße)	PP von NO	Fotogr.	StB	7746-37
1938	1930er Jahre (Zelt unter Tor)	PP von NO	Fotogr.	StB	4632-60
1940	1940er Jahre (Schwibbogenstraße, Laterne)	PP von NO	Fotogr.	StB	110-21
1941	1940er Jahre (Schwibbogenstraße, Laterne)	PP von NO	Fotogr.	StB	132-17
1941	1940er Jahre (Turm und Tor)	PP von NO	Fotogr.	StB	132-18

Zeit	Thema	Bereich	Darst.art	Archiv	Signatur
1941	1940er Jahre (Turm und Tor)	PP von NO	Fotogr.	StB	132- 21
1948	späte 1940er Jahre (mit Römerhof)	PP von NO	Fotogr.	StB	4659-64
1948	1948: Tordurchgang (Putz geschädigt)	Tor von N	Fotogr.	StB	B 127
1955	1950er Jahre, mit Opel aus den 40er Jahren	PP von NW	Fotogr.	StB	11217-1
1958	Ostwand, Steindetail (Balkenaufleger?)	O-Fass.von O	Fotogr.	StB	9487- 13
1958	Sanierung 1958: Ostwand, eingerüstet	Turm, UG-OG v.NO	Fotogr.	StB	9487- 14
1958	Vor Sanierung 1958	PP von NO	Fotogr.	StB	2764-2
1958	Vor Sanierung 1958	Turm, OG-UG v. NO	Fotogr.	StB	2772-24
1958	Vor Sanierung 1958	Turm, Tor	Fotogr.	StB	4659-76
1958	Vor Sanierung 1958	Turm, Tor	Fotogr.	StB	8057-30
1958	Vor Sanierung 1958, m. Putzritzung O-Wand	PP von NO	Fotogr.	StB	9487-2
1958	Nach Sanierung 1958, "fleckiges" Mauerwerk	Turm, OG-UG v. N	Fotogr.	StB	9487-3
1958	Nach Sanierung 1958, "fleckiges" Mauerwerk	Turm, OG-UG v. NW	Fotogr.	StB	9487-4
1958	Nach Sanierung 1958	Tor von N	Fotogr.	StB	9487-5
1958	Nach Sanierung 1958	Ostwand von NO	Fotogr.	StB	9487-6
1958	Vor Sanierung 1958	PP von NO	Fotogr.	?	o. Bez. Nr.1
1958	Vor Sanierung 1958, mit Putzritzung O-Wand	PP von NO	Fotogr.	BLFD	BLFD 01
1958	Nach Sanierung 1958, neue Einputzung	PP von NO	Fotogr.	BLFD	BLFD 02
1958	Nach Sanierung 1958	Turm, OG von NW	Fotogr.	BLFD	BLFD 03
1958	Nach Sanierung 1958, "fleckiges" Mauerwerk	Turm, OG-UG v. NW	Fotogr.	BLFD	BLFD 04
1958	Nach Sanierung 1958	Tor von N	Fotogr.	BLFD	BLFD 05
1958	Nach Sanierung 1958	Ostwand von NO	Fotogr.	BLFD	BLFD 06
1958	Sanierung 1958: Ostwand, eingerüstet	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 07
1958	Sanierung 1958: Ostwand-OG, eingerüstet	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 08
1958	Sanierung 1958: Ostwand, eingerüstet	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 09
1958	Sanierung 1958: Ostwand-UG, eingerüstet	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 10
1958	Sanierung 1958: Ostwand-UG, eingerüstet	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 11
1958	Sanierung 1958: Ostwand-UG, eingerüstet	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 12
1958	Sanierung 1958: Ostwand, bautechn. Det.	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 13
1958	Sanierung 1958: Ostwand-UG, eingerüstet	Ostwand, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD 14
1958	Sanierung 1958: Nordwand mit Inschriftentafel	PP Inschriftentafel	Fotogr.	BLFD	BLFD 16
1966	Photogrammetrie - Bl. 14, Turm/ O-Fass. UG, OG	Turm, O-Fass. v. O	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 15, O-Fass./ Turm UG, OG	Ostwand, Turm v. O	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 15, NO-Fassade, UG, OG	Turm von N, O	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Blatt 15A, Vertikalschnitte	PP, Vertikalschnitte	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 15C, O-Fassade v. Innen	Ostwand, Turm v. I	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 15D, O-Fassade	O-Fass., Vertikalschnitte	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 16, N-Fassade UG, OG	Turm von N	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 16, Torbogen von N	Tor von N	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 16D-17D, N-, W-Fassade	PP, Vertikalschnitte	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 16C, N-Fassaden	Turm N von Innen	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 17, W-Fassade	Turm von W	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 17C, W-Fassade	Turm W von Innen	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Bl. 18C, Tor von S	Turm W von Innen	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Innenansicht	PP	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Tordurchgang v. S.	Tor von S	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1966	Photogrammetrie - Detail	PP	Photogr.	StA	nicht bezeichnet
1970	Plan - Bischofshof, Umbauplan zu Hotel	Grundriss, OG 1	Plan	StA	Bischofshof
1970	Plan - Bischofshof, Umbauplan zu Hotel	Grundriss, OG 2	Plan	StA	Bischofshof
1970	Plan - Bischofshof, Umbauplan zu Hotel	Grundriss, EG	Plan	StA	Bischofshof
1970	Plan - Bischofshof, Umbauplan zu Hotel	Grundriss, KG 1	Plan	StA	Bischofshof
1970	Plan - Bischofshof, Umbauplan zu Hotel	Grundriss, OG 1?	Plan	StA	Bischofshof
1971	1970er Jahre (Detail Steinbearbeitung)	Ostwand, Sockel?	Fotogr.	BLFD	BLFD L 46-32
1971	1970er Jahre (Detail Steinbearbeitung)	Turm v. NO, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 46-34
1971	1970er Jahre (Detail Steinbearbeitung)	Turm v. NO, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 46-35
1971	1970er Jahre (Detail Steinbearbeitung)	Turm v. NW, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 46-36



Zeit	Thema	Bereich	Darst.art	Archiv	Signatur
1971	1970er Jahre (Detail Steinbearbeitung)	Turm v. NO, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 46-37
1971	1970er Jahre (Bauwagen davor)	Turm, OG-UG v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 57-11
1971	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, OG-UG v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 57-12
1971	1970er Jahre (Tor noch m. Schacht u. Fenster)	Tor von N	Fotogr.	BLFD	BLFD L o.Sign.
1971	Rekonstruktion der Portalanlage	PP v. N, Ans., Grundriss	Photogr.	Bericht	Bay. Bod.denkm.
1974	1970er Jahre (alle Geschosse)	Turm von N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 110-7
1974	1970er Jahre (alle Geschosse)	Turm von N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 110-09
1974	1970er Jahre (alle Geschosse)	Turm von N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 110-12
1974	1970er Jahre (alle Geschosse, park. Autos)	Turm von NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 110-04
1974	1970er Jahre (alle Geschosse)	Turm von NW	Fotogr.	BLFD	BLFD L 107-08
1974	1970er Jahre (alle Geschosse, Parkschild)	Turm von NW	Fotogr.	BLFD	BLFD L 107-15
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm v. N, Detail	Fotogr.	BLFD	BLFD L 106-23
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm v. NO, Detail	Fotogr.	BLFD	BLFD L 106-29
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm v. NO, Detail	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-26
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm v. NO, Detail	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-34
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm v. NO, Detail	Fotogr.	BLFD	BLFD L 109-6,-7
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm v. NO, Detail	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-24,-7
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm v. NO, Detail	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-26
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm Innen	Fotogr.	BLFD	BLFD L 119-16
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Mauerwerk)	Ostwand v. O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 55-03
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Mauerwerk)	Ostwand v. O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 55-07
1974	1970er Jahre (weiss verflecktes Mauerwerk)	Turm, UG v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 106-15
1974	1970er Jahre (weiss verflecktes Mauerwerk)	Turm, UG v. W, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-30
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG v. NW, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-31
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG v. NW	Fotogr.	BLFD	BLFD L 131-17
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 106-25,-26
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 131-17
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG v. NW, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 109-5
1974	1970er Jahre (Kaminaussparung; Mauerwerk)	Turm, UG v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-10
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG v. N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-15
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG v. N, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-29
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Quadermwk)	Ostwand v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-04
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Quadermwk)	Ostwand v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-06
1974	1970er Jahre (Det.: gespaltene Quader)	Ostwand v. O, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-07
1974	1970er Jahre (fragm. Quadermauerwerk)	Ostwand v. O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-08
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Quadermwk)	Ostwand v. O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-09
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Quadermwk)	Ostwand v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-32
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Quadermwk)	Ostwand v. NO, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-34
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Quadermwk)	Ostwand v. N, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-35
1974	1970er Jahre (zurückgesetztes Quadermwk)	Ostwand v. O, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 55-05
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG-OG v. N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 106-30
1974	1970er Jahre (stein- und bautechnische Det.)	Turm, UG-OG v. NW	Fotogr.	BLFD	BLFD 108-37,-36
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG v. NW, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 109-12
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG v. NW, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 109-4
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG v. NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 106-16
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG v. O, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-07
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG von O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-13
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG von NO	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-14
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG von O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-19-2
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster, Ostwand)	Turm, OG von O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-26
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster)	Turm, OG von NO, Det.	Fotogr.	BLFD	BLFD L 111-29a
1974	1970er Jahre (Rundbogenfenster, Details)	Turm, OG von N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 108-35
1974	1970er Jahre (Quaderfreilegung)	Turm, Innen OG v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 107-03
1974	1970er Jahre (Quaderfreilegung)	Turm, Innen OG v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 107-05
1974	1970er Jahre (Quaderfreilegung, Fenster)	Turm, Innen OG v. S	Fotogr.	BLFD	BLFD L 107-28
1974	1970er Jahre (Torbogen von der Innenseite)	Tor, Durchgang v. S	Fotogr.	BLFD	BLFD L 109-03

Zeit	Thema	Bereich	Darst.art	Archiv	Signatur
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Fenster nach O)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 112-09
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Fenster nach O)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 112-10
1974	1970er Jahre (Quadermauerwerk, Detail)	Turm, Innen UG v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 112-14
1974	1970er Jahre (Quadermauerwerk, Detail)	Turm, Innen UG v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 112-15
1974	1970er Jahre (Verputz und Quadermauerwerk)	Turm, Innen UG v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 07
1974	1970er Jahre (Verputz u. Quadermauerwerk, Det.)	Turm, Innen UG v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 11
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Lüftungsöffn.)	Turm, Innen UG 2 v. S .	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 12
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Gurtbögen)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 13
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Gurtbögen)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 15
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Gurtbögen)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 16
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Fenster nach O)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 17
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Fenster nach O)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 19
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Längsachse)	Turm, Innen UG 2 v. N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 20
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Gurtbögen)	Turm, Innen UG 2 v. O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 22
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: vern. Westöffn.)	Turm, Innen UG 2 v. O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 24
1974	1970er Jahre (Kartoffelkeller: Sudhauseingang)	Turm, Innen UG 2 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 25
1974	1970er Jahre (1. UG, Abschluss nach N)	Turm, Innen UG 1 v. S	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 26
1974	1970er Jahre (1. UG, Abschluss nach N)	Turm, Innen UG 1 v. S	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 29
1974	1970er Jahre (1. UG, Quadermwk, Gurtb.)	Turm, Innen UG 1 v. O	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 31
1974	1970er Jahre (1. UG, Quadermwk, Gurtb.)	Turm, Innen UG 1 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 33
1974	1970er Jahre (1. UG, Quadermwk, Gurtb.)	Turm, Innen UG 1 v. W	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 36
1974	1970er Jahre (1. UG, Quadermwk, Gurtb.)	Turm, Innen UG 1 v. N	Fotogr.	BLFD	BLFD L 113- 37
1975	Plan - Bischofshof, Umbauplan d. Hoteltraktes	Ansicht von N, S	Plan	StA	Bischofshof
1978	Plan - Bischofshof, Bestandsaufnahme d. Fass.	Ansicht v. N, W, O	Plan	StA	Bischofshof
1978	Plan - Bischofshof, Fassadenrenovierung	Ansicht v. N, W, O	Plan	StA	Bischofshof
1978	Plan - Bischofshof, Fassadenrenovierung	Grundrisse KG, EG	Plan	StA	Bischofshof
1980	1980er Jahre ( PP m. Umfeld: Bischofshof)	PP von NO	Fotogr.	StB	3252-6a
1980	1980er Jahre (alle Geschosse)	PP von NO	Fotogr.	StB	9297-23
1980	1980er Jahre (Tor mit Besuchergruppe)	Tor von N	Fotogr.	StB	2764-02
1987	1980er Jahre (alle Geschosse und Boller)	PP von NO	Fotogr.	StB	3863-32
1990	1980er Jahre ( PP m. Umfeld: Bischofshof)	PP von O	Fotogr.	StB	5305-15
1990	1990er Jahre (alle Geschosse und Tor)	PP von NW	Fotogr.	StB	o. Bez. Nr. 2
1992	Holzmodell - Errichtung der Portalanlage	PP von N	Modell	StB	6875-2
1992	Holzmodell - Errichtung der Portalanlage	PP von N	Modell	StB	6959-18
1995	1990er Jahre (PP mit Umfeld: Römerhof)	PP von NO	Fotogr.	StB	10313-2
1999	1990er Jahre (Ostwand UG, Quaderdetail)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13562-01
1999	1990er Jahre (O.fassade mit Tordurchfahrt)	Ostwand von SO	Fotogr.	StB	13562-02
1999	1990er Jahre (Ostwand UG )	Ostwand UG von SO	Fotogr.	StB	13562-05
1999	1990er Jahre (Torbogensteine von unten)	Tor von unten	Fotogr.	StB	13563-03
1999	1990er Jahre (Ostwand, Detail Quadermwk)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13563-06
1999	1990er Jahre (Ostwand, Detail Quadermwk)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13563-07
1999	1990er Jahre (Ostwand, Detail Quadermwk)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13563-08
1999	1990er Jahre (Ostwand, Detail Quadermwk)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13563-09
1999	1990er Jahre (Ostwand, Detail Quadermwk)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13563-10
1999	1990er Jahre (Ostwand, Quaderfuge)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13563-11
1999	1990er Jahre (Ostwand, Quaderfuge)	Ostwand v. O (Detail)	Fotogr.	StB	13562-12
2000	2000 (1. UG, Abschluss nach Norden)	Turm, Innen UG 1 v. S	Fotogr.	StB	14235-13
2000	2000 (1. UG, Abschluss nach Norden)	Turm, Innen UG 1 v. S	Fotogr.	StB	14235-2
2000	2000 (1. UG, östl. Mauer, Längsachse nach S)	Turm, Innen UG 1 v. N	Fotogr.	StB	14235-14
2000	2000 (1. UG, Quadermwk m. zugem. Ostfenster)	Turm, Innen UG 1 v. W	Fotogr.	StB	14235-20
2000	2000 (1. UG, Quadermwk. nördl. Gurtb.)	Turm, Innen UG 1 v. O	Fotogr.	StB	14235-8
2000	2000 (Tor in Übersicht von N)	Tor von N	Fotogr.	n. a.	Übersicht_01-A
2000	2000 (Tor in Übersicht von S)	Tor von S	Fotogr.	n. a.	Übersicht_01-I
2000	2000 (Torbogenlaibung, Quadermwk von W)	Tor von W (Detail)	Fotogr.	n. a.	Detail_01a
2000	2000 (Torbogenlaibung, Quadermwk von W)	Tor von W (Detail)	Fotogr.	n. a.	Detail_01b

Zeit	Thema	Bereich	Darst.art	Archiv	Signatur
2000	2000 (Torbogenlaibung, Quadermwk von unten)	Tor von W (Detail)	Fotogr.	n. a.	Detail_01c
2000	2000 (Torbogenlaibung, Quadermwk von O)	Tor von O (Detail)	Fotogr.	n. a.	Detail_01d
2000	2000 (Torbogenlaibung, Quadermwk von O)	Tor von O (Detail)	Fotogr.	n. a.	Detail_01e
2000	2000 (Turm, alle Geschosse, von W)	Turm von W	Fotogr.	n. a.	Übersicht_02
2000	2000 (Turm, OG, von W, Rundbogenfenster)	Turm, OG v. W, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_02a
2000	2000 (Turm, OG-UG, von W, Gesims)	Turm, OG-UG v. W, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_02b
2000	2000 (Turm, UG, von W, Quadermauerwerk)	Turm, UG v. W, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_02c
2000	2000 (Turm, alle Geschosse, von NW)	Turm von NW	Fotogr.	n. a.	Übersicht_03
2000	2000 (Turm, OG, von NW, Rundbogenfenster)	Turm, OG v. NW, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_03a
2000	2000 (Turm, OG-UG, von NW, Gesims)	Turm, OG-UG v. NW, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_03b
2000	2000 (Turm, UG, von NW, Quadermauerwerk)	Turm, UG von NW, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_03c
2000	2000 (Turm, alle Geschosse, von NO)	Turm von NO	Fotogr.	n. a.	Übersicht_04
2000	2000 (Turm, OG, von NO, Rundbogenfenster)	Turm, OG v. NO, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_04a
2000	2000 (Turm, OG-UG, von NO, Gesims)	Turm, OG-UG v. NO, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_04b
2000	2000 (Turm, UG, von NO, Quadermauerwerk)	Turm, UG v. NO, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_04c
2000	2000 (Turm, alle Geschosse, von O)	Turm von O	Fotogr.	n. a.	Übersicht_05
2000	2000 (Turm, OG, von O, Rundbogenfenster)	Turm, OG v. O, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_05a
2000	2000 (Turm, OG-UG, von O, Gesims)	Turm, OG-UG v. O, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_05b
2000	2000 (Turm, UG, von O, Quadermauerwerk)	Turm, UG v. O, Det.	Fotogr.	n. a.	Detail_05c
2000	2000 (Ostwand von O, Quadermauerwerk)	Ostwand von O	Fotogr.	n. a.	Übersicht_06
2000	2000 (Quader d. westl. Flankenturmes, von N)	Turm (Fragm.) von N	Fotogr.	n. a.	Übersicht_07
2000	2000 (Ostfassade m. Tordurchfahrt)	Ostfassade von O	Fotogr.	n. a.	Übersicht_08
2001	Katasterplan, nördl. Stadtbereich m. Bischofsh.	Stadt, nördl. Ausschnitt	Kat.plan	LbA	2001 (dat.)
2001	Aufmaß - röm. Bauinschrift	Bauinschrift, Ansicht	verf. Aufm.	n.a.	Bauinschrift 1
2001	Aufmaß - röm. Bauinschrift	Bauinschrift, Grundriss	verf. Aufm.	n.a.	Bauinschrift 2
2001	Aufmaß - Turm-Abwicklung, UG	Turm, Abwicklung, UG	verf. Aufm.	n.a.	Turmansicht UG
2001	Aufmaß - Torbogen vom Durchgang, Laibung	Tor von S, O, W	verf. Aufm.	n.a.	Tordurchgang S
2001	Aufmaß - Torbogen von N m. Anschlussbereich	Tor von N	verf. Aufm.	n.a.	Tordurchgang N
2001	Aufmaß - Detail Architrav, Ansicht, Schnitte	Turm, Architrav (Detail)	verf. Aufm.	n.a.	Architrav-Detail 1
2001	Aufmaß - Detail Kämpferstein, Ansicht, Schnitte	Turm, Kämpfer (Detail)	verf. Aufm.	n.a.	Kämpfer-Detail 1
2001	Aufmaß - Detail Kämpferstein, Ansicht	Turm, Kämpfer (Detail)	verf. Aufm.	n.a.	Kämpfer-Detail 2
2001	Aufmaß - Detail Kapitell u. Gesims, Ansicht	Turm, Kämpfer (Detail)	verf. Aufm.	n.a.	Kämpfer-Detail 2
2001	Aufmaß - Turm-Abwicklung, OG, Rundbogenf.	Turm, Abwicklung, OG	verf. Aufm.	n.a.	Turmansicht OG
2001	Aufmaß - Toranlage-Querschn., 1. Schnitt von u.	Tor, Querschnitt, UG	verf. Aufm.	n.a.	PP-Querschnitt 1
2001	Aufmaß - Toranlage-Querschn., 2. Schnitt von u.	Tor, Querschnitt, UG	verf. Aufm.	n.a.	PP-Querschnitt 2
2001	Aufmaß - Toranlage-Querschn., 3. Schnitt von u.	Tor, Querschnitt, OG	verf. Aufm.	n.a.	PP-Querschnitt 3
2001	Aufmaß - Toranlage-Querschn., 4. Schnitt von u.	Tor, Querschnitt, OG	verf. Aufm.	n.a.	PP-Querschnitt 4
2001	Aufmaß - Toranlage-Querschn., 5. Schnitt von u.	Tor, Querschnitt, OG	verf. Aufm.	n.a.	PP-Querschnitt 5
2001	Aufmaß - Turm-Innen, OG 1, Hochzeitszimmer	Turm, Innen, OG 1, v. S	verf. Aufm.	n.a.	Turm Innen OG
2001	Aufmaß - Turm-Innen, UG 1, Ansicht von Innen	Turm, Innen, UG 1, v. S	verf. Aufm.	n.a.	Turm-I-UG 1a
2001	Aufmaß - Turm-Innen, Längsschnitt durch Turm	Turm, Innen, v. W	verf. Aufm.	n.a.	Turm-I-UG-OG 1
2001	Aufmaß - Turm-Innen, Längs- und Querschnitt	Turm, Innen, v. S.	verf. Aufm.	n.a.	Turm-I-UG-OG 2
2001	Aufmaß - Turm-Innen, Längs- und Querschnitt	Turm, Innen, v. N.	verf. Aufm.	n.a.	Turm-I-UG-OG 2

#### ABKÜRZUNGEN:

##### Archive:

HMR	Historisches Museum Regensburg
LbA	Luftbildarchiv
MFTT	Museum Fürst Thurn und Taxis
n.a.	nicht archiviert
StA	Stadtarchiv
StB	Stadtbildstelle

##### Sonstige:

A	Aussen
Ans.	Ansicht
bautechn.	bautechnisch

Bischofsh.	Bischofshof
Det.	Detail
Fass.	Fassade
Fotogr.	Fotografie
Gurtb.	Gurtbogen
I	Innen
Illustr.	Illustration
Kat.plan	Katasterplan
künstl. D.	künstlerische Darstellung
m.	mit
N	Nord
O	Osten
Öfn.	Öffnung
OG	Obergeschoss
Photogr.	Photogrammetrie
Postk.	Postkarte
PP	porta praetoria
Qadermwk	Quadermauerwerk
Querschn.	Querschnitt
Renov.	Renovierung
Römerh.	Römerhof
Rundbogenf.	Rundbogenfenster
S	Süd
Sudh.	Sudhaus
SW	Schwarz-Weiss
u.	unten
UG	Untergeschoss
v.	von
verf. Aufm.	verformungsgerechtes Aufmaß
verm.	vermauert
W	Westen

## Teil B: Die Kalksteine an der Porta Praetoria

### 1 Kalksteine und Herkunftsanalyse

#### *Vorbemerkung*

Bei der Bestandsaufnahme und Analyse historischer Bauwerke kommt der Frage nach der Herkunft der Baumaterialien eine wichtige Rolle zu. Läßt sie sich beantworten, so liegen zuverlässige Informationen über die Handels- und Transportwege oder die Bau- und Veränderungsgeschichte vor, die neue Perspektiven auf die kultur- und baugeschichtliche Entwicklung eines Denkmals eröffnen können. Ein Beispiel ist die Bestimmung von Kalksteinen, die einem engeren regionalen Umfeld zugerechnet werden. Die exakte Analyse ihrer Herkunft ist ein in der Denkmal-Forschung bislang kaum bearbeitetes Kapitel, das auch tiefe Einblicke in die Entstehungsgeschichte des Kalksteins gewährt.

Die Wahl der Baustoffe für eine militärischen Einrichtung wie der porta praetoria wird sich auf recht nüchterne Überlegungen beschränkt haben. In erster Linie sollte es ein wehrhafter Zweckbau sein, bei dessen Errichtung und Planung sicher taktische und praktische Erwägungen den Ausschlag gegeben haben. So wird der erste Spatenstich von der strategischen Bedeutung und Lage des ausgesuchten Ortes geleitet gewesen sein. Gleich danach kommen nicht minder wichtige Voraussetzungen, wie das Vorhandensein geeigneter Baustoffe, das Vorliegen einer Energieversorgung und die Anbindung an ein sicheres Wegenetz. Dies war vermutlich gestern nicht anders als heute – mit der Ausnahme, dass regionale Rohstoffvorkommen in einer hochtechnisierten und globalisierten Welt ihre Bedeutung weitgehend verloren haben.

Für die Keimzelle des heutigen Regensburg um 170 n. Chr. waren anscheinend alle Prämissen (über-) erfüllt: Der Ort war als Verkehrsknotenpunkt und Baustein innerhalb der römischen Verteidigungslinien gegen die in das Römische Reich drängenden Germanen von enormer strategischer Bedeutung. Baumaterialien waren in Form von Kalkstein und Holz reichlich vorhanden. Sie konnten ohne große Mühen oder Transporthindernisse unmittelbar aus der steinreichen und dicht bewaldeten Umgebung bezogen werden. Außerdem bot sich das Flussnetz als eine für Schwerttransporte geradezu ideale Infrastruktur an, zumal man den Fluss und seine Eigenarten spätestens seit der Besiedelung des Kelheimer Raumes bestens kannte. Der Ort hätte nicht besser gewählt sein können.

Dass ästhetische Gründe für die Auswahl der Naturwerksteine bei der Errichtung der Mauer des Legionärs-lagers eine entscheidende Rolle gespielt haben, darf bezweifelt werden. Schließlich lebte man nicht in friedvollen Zeiten auf einem ruhigen Posten in der Etappe, auf dem man sich Gedanken über Fassadendekorationen hätte hingeben können. Vielmehr benötigte man rasch große Mengen eines leicht zu verarbeitenden und gleichwohl widerstandsfähigen Materials, das einen sicheren Schutz gegen die anstürmenden Barbaren garantierte.

Andererseits gehörte die römische Besetzung der Bauzeit einer blühenden und ruhmreichen Hochkultur an, die großen Wert auf die Demonstration ihrer Machtposition und technischen Überlegenheit legte, was in den höchst imposanten Fragmenten der Toranlage der porta praetoria nachdrücklich zum Ausdruck kommt. Die Architektur der vier Doppelturmanlagen ist fraglos eine von Verteidigungszwecken geleitete, aber eben nicht ausschließlich davon bestimmte. Die Portale sind nicht als Bollwerk mit nur einem leicht zu verteidigenden schmalen Zugang konzipiert. Ganz im Gegenteil: Es handelt sich um hohe, provozierend breite Zweitoreanlagen, aus denen die unbezwingbare Dominanz der Besatzer zu sprechen scheint. Der die Machtfülle manifestierende, betont repräsentative Charakter der Portale wird durch gestalterische Elemente wie die (nicht fertig gestellten) Pilaster an der Nordseite, fein gehauene Gesimsprofile oder die imposante Inschriftentafel an der porta praetoria nachhaltig unterstrichen.

Es versteht sich von selbst, dass die römischen Baumeister und Konstrukteure über einen exquisiten Stab an Fachleuten verfügten, der ihnen das Auffinden qualitativ hochwertiger Steinbrüche ebenso ermöglichte wie deren extensive Ausbeutung. Auch die Kenntnis aller handwerklicher Formen der Gesteinsbearbeitung oder die Lösung aller mit dem Bau verbundenen Transportprobleme, dürfen als selbstverständlich vorausgesetzt werden. Das tradierte technische Wissen der späten Römerzeit ist einer lebendigen, über Jahrhunderte hinweg gewachsenen multikulturellen Gesellschaft zuzuschreiben, die sich ihres zivilisatorischen Status wohl bewusst war. Aus diesem Grund wäre es mehr als verwunderlich, wenn gerade die porta praetoria aus irgendwelchen, wahllos zusammengesuchten Quadern bestünde – eher sollte man schon von der Verwendung ausgesuchter Materialien ausgehen.

Historische Bauwerke sind nicht mehr das, was sie einmal waren. In den uns verbliebenen, oftmals nur noch fragmentarisch erhaltenen Sichtschalen, ist die wechselvolle Geschichte gleichsam festgeschrieben. Der „gewachsene“ Zustand ist es aber, der den unvergleichlichen Reiz und die Authentizität historischer Gebäude und ihre Einzigartigkeit ausmacht. Authentizität ist immer das Resultat einer Reihe gestalterischer oder überformender Eingriffe, die bald nach der Errichtung beginnt und mit dem Verschwinden des Gebäudes endet. Nur in glücklichen Einzelfällen ist die Geschichte in übereinander liegenden, historischen Jahresringen vergleichbaren Schichtungen, ohne Störungen aufgewachsen. „Gewachsen“ kann aber noch eine andere, recht banale Bedeutung haben:

a) Da ist die im Vergleich zur Bauzeit oft zu konstatierende wundersame Materialvermehrung, die der natürliche Ausdruck einer lebhaften und bis heute fortgeschriebenen Nutzungs-, Reparatur- und Restaurierungsgeschichte ist.

b) Auch beobachtet man eine erschreckende Zunahme an sekundären Auflagerungen, die sich am unverfänglichsten mit dem lapidaren Begriff „Gipskruste“ fassen lassen.<sup>1</sup> Die pustelige, meist schmutzig erscheinende Sulfathaut, die vielen historischen Bauwerken nicht unbedingt zur Zierde gereicht, gleicht dem wehrhaften Versuch der Materie, in einer aggressiven Umwelt überleben zu wollen. Das derart aufgewachsene Mehr ist alles andere als ein natürlicher Schorf oder eine schützende Patina – vielmehr ist es oftmals das Endstadium einer chemischen Umwandlung und das Substrat gewordene Leinentuch der historischen Epidermis des Bauwerks.

<sup>1</sup> „Wettersteinkruste“ ist ein weiterer, recht unbedarfter Ausdruck für dasselbe Zeretzungsphänomen historischer Oberflächen, in diesem Fall mittelalterliche Glasfenster.

Aus den skizzierten Gründen bietet die Außenhaut historischer Gebäude oft ein verwirrendes Stückwerk aus verschiedenen Zeiten und Einflüssen. Die porta praetoria ist ein besonders eindrucksvolles Beispiel des geschichtlichen Wandels. Und würden die Fragmente nicht seit gut 120 Jahren unter dem besonderem Schutz traditionsbewusster Bürger stehen, wäre der dunkle Fleck im strahlend weißen Rund des Bischofshofes wohl schon längst verschwunden. Um aber dem imposanten Relikt wieder die Aufmerksamkeit zukommen zu lassen, die es verdient und es im Bewusstsein der Bevölkerung zu verankern, muss man das Dickicht der gewachsenen Geschichte etwas lichten, das vernachlässigte Äußere beheben und das verwirrende äußere Erscheinungsbild transparent machen.

Dabei versteht sich die Herkunftsanalyse als Hilfswissenschaft der Bauforschung. Sie soll der Klärung des zeitlichen und thematischen Neben- und Übereinanders von Baumaterialien dienen und die historischen Dimensionen eines Bauwerkes aufklären helfen. Im einfachen Fall, wie der Zuordnung von Ziegelausflickungen in Kalksteinmauerwerk, sind keine weiteren Analysen notwendig; hier genügt das sachkundige oder interessierte Auge. Anders verhält es sich mit der Bestimmung von Bauphasen innerhalb des Kalksteinmauerwerks oder dem Nachweis späterer Veränderungen mit dem gleichen Material. An dieser Stelle kann der Faziesanalyse als einer Sonderform der „hoch auflösenden“ Kalksteinbeschreibung eine besondere Funktion zukommen. Denn Kalkstein ist nicht gleich Kalkstein. Der sedimentologische Fingerabdruck einer Abbaustätte ist zwar nicht leicht in verbauten Quadern wiederzufinden, doch unmöglich ist seine Charakterisierung nicht.

Dass die synchrone Betrachtung der in geologischen Zeiträumen ablaufenden Genese der Kalksteine und der in historischen Dimensionen denkenden Baugeschichte zu spannenden und aufschlussreichen Ergebnissen führen kann, sollen die Untersuchungen im Folgenden demonstrieren.

#### *Zur Methode der Herkunftsanalyse*

Mit zunehmendem Alter von Objekten wird es immer schwieriger, eindeutige Angaben zur Herkunft ihrer Materialien zu machen. Der Umfang an Veränderungen und sekundären Einflüssen nimmt mit der Zeit kontinuierlich zu und verfälscht das ursprüngliche Bild. Archivunterlagen über den Handel und den Transport von Naturwerksteinen sowie Handwerksbücher von Steinmetzen und Hüttenbaumeistern liefern zweifelsohne die ersten und besten Hinweise. Fehlen jedoch zuverlässige Quellen, was leider der Regelfall ist, muss man auf andere Methoden zurückgreifen.

Eine Zuordnungs- und Datierungsmöglichkeit sind vergleichende geologische und sedimentologische Analysen. Sie erlauben bei Kenntnis der in der Umgebung des Bauwerkes anstehenden Gesteine Rückschlüsse auf die Herkunft der verbauten Quader, in denen die Entwicklung der Ablagerungsräume der Sedimente zur Zeit der Gesteinsbildung festgeschrieben ist. Hierbei helfen sogenannte paläogeographische Verteilungskarten. Sie dokumentieren die räumliche und zeitliche Verteilung von Land und Meer in dem entsprechenden geologischen Zeitfenster und gliedern die Ablagerungsräume gemäß ihrer sedimentologischen Vielfalt.

Im Fall von Sandsteinen bedeutet dies, dass die großräumige Verteilung der verschiedenen Ablagerungsräume von Gebieten mit alluvialen Schüttungsfächern über fluviatile Bereiche bis hin zu äolischen Gebieten oder anderen Milieus bekannt sein muss. Der Sedimentologe kann anschließend die Sandsteine eines Bauwerkes aufgrund ihrer charakteristischen Merkmale zuordnen, zu denen die mineralogische

Zusammensetzung, Korngröße und Sortierung, der Schwermineralgehalt und die Zementation gehören.

Bei Kalksteinen ist ein vergleichbares Vorgehen erfolgreich. Sie bestehen im chemischen Sinne aus Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) und werden überwiegend aus Lockersedimenten in Lagunen gebildet oder sie entstehen aus carbonatischen Sanden in Bereichen mit hoher Wasserenergie oder aus Riffschutt. Eine Sonderform sind Kalksteine, die sich in Form von Riffen gebildet haben und auf die Carbonatproduktion von Organismen, wie den Korallen, zurückgehen. Im Zusammenhang mit den an der porta praetoria untersuchten Steinen rankt sich der wissenschaftliche Disput um die Frage, ob und inwieweit das Wissen über heute gebildete (rezente) Carbonate auf fossile übertragen werden kann (Aktualitätsprinzip). Diese Frage wird gerade für die Kalksteine des Oberen Jura immer wieder diskutiert.

Die Forschung der letzten 50 Jahre hat viele komplexe Zusammenhänge zu einfach gesehen und unbequeme Fragen oft ausgeblendet. Man hielt an einem Modell der Ablagerung der Malm-Sedimente fest, das einzigartig in der Erdgeschichte zu sein schien und scheute sich, rezente Vergleiche anzustellen. Erst in den letzten 15 Jahren wurden neuere Erkenntnisse über die Entstehung der sogenannten „Schwammriffe“ und „Massenkalke“ gewonnen.<sup>2</sup> Diese Daten fließen nur langsam in die Literatur ein. Daraus ergibt sich, dass auch die in der älteren Fachliteratur und der Geologischen Karte von Bayern gezogenen Schlussfolgerungen kritisch hinterfragt werden müssen.

Die Methode der Herkunftsanalyse soll am Beispiel der Kalksteine der porta praetoria näher erläutert werden. Trotz mancher Literaturangabe wird die sedimentologische Grundlage eingehender beleuchtet, da oft nur Hinweise „vom Hörensagen“ angeführt sind, das Ziel der Untersuchungen aber objektive wissenschaftliche Aussagen sein sollen:

- Die Voraussetzung für jede Herkunftsanalyse ist zunächst die exakte Klassifizierung der am Bauwerk vorgefundenen Gesteinstypen. Sie bildet die Grundlage für alle weiteren Schlussfolgerungen. Die Untersuchung an der porta praetoria lieferte – dies sei hier vorweg genommen – fünf verschiedene sogenannte Faziestypen.<sup>3</sup>
- Im nächsten Schritt muss die geologische bzw. sedimentologische Entwicklung der Schichtenabfolge, die die Herkunft der Naturwerksteine beschreibt, aus der Literatur erarbeitet werden. Für die porta praetoria bestand die Schwierigkeit, dass nicht die aktuell gültige Carbonatklassifikation benutzt wurde<sup>4</sup> und der

<sup>2</sup> Die korrekte Bezeichnung lautet: oberjurassische Spongiolithe. Sie wurden im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogramms bearbeitet (Biogene Sedimentation. Riff-Evolution und Kreide-Sedimentation).

<sup>3</sup> „Faziestypen“ repräsentieren im Erscheinungsbild des jeweiligen Kalksteins einen bestimmten Ablagerungsraum zur Zeit seiner Bildung im Meer des Oberjura und beinhalten alle Merkmale, die sie vom Ablagerungsraum ererbt haben und die bis heute erhalten sind. Die mikroskopische Analyse (Mikrofaziesanalyse) liefert alle für eine exakte Ansprache erforderlichen Details. So sind Aussagen zu den gesteinsbildenden Zementen möglich. Sie haben aus den ehemaligen lockeren Sedimenten feste Kalksteine werden lassen und spiegeln die chemische Zusammensetzung der Lösungen wider (im einfachsten Falle des Meerwassers), aus welchen die Kristalle während der Zementation gefällt wurden.

<sup>4</sup> Die heute geltende Carbonatklassifikation wurden 1962 und 1972 erstellt und international verbreitet. Die Arbeiten zu den Kalksteinen um Regensburg datieren aber aus den 1950er Jahren.

Schwerpunkt der Arbeiten auf der zeitabhängigen stratigraphischen Einstufung der Einzelschichten sowie der Erfassung ihrer vertikalen und lateralen Entwicklung lag.

- Aus diesem Grund musste ein Richtprofil aus der nahen Umgebung – dem potenziellen Herkunftsgebiet der Naturwerksteine – erarbeitet werden. Es handelt sich um das Profil des der porta praetoria gegenüber gelegenen Keilbergs (Keilbergprofil).

Bei den Angaben zur möglichen Herkunft von Steinquadern ist die tatsächliche Situation im Steinbruch während des Abbaus zu berücksichtigen. So gehorcht das Steinbrechen bestimmten Gesetzmäßigkeiten, nach denen bevorzugt die hangenden Schichten schrittweise erfasst und ausgebeutet werden. Normalerweise beginnt man am Fuß eines Berges, an dem nutzbare Gesteine anstehen. Der Abbau wird dann in einzelnen, übereinander liegenden und gegeneinander versetzten Stufen vorangetrieben.

Wenn nun verschiedene Kalksteintypen entsprechend ihrer geologischen Entwicklung übereinander gelagert vorkommen, sollte sich dies in der zeitlichen Abfolge der an die Baustelle angelieferten Rohblöcke widerspiegeln. Die von der Abbaumethode bestimmte Gesetzmäßigkeit müsste sich in der Reihenfolge der am Bau versetzten Steine wiederfinden lassen: Was zuerst abgebaut wurde, wäre in den unteren Mauerlagen zu finden, während die zuletzt abgebauten Quader in den oberen bzw. in den jüngsten Bauabschnitten anzutreffen wären.

Auf komplexe Bauwerke und Großbaustellen – wie es die Castra Regina mit großer Wahrscheinlichkeit war – ist diese Betrachtungsweise nur mit Einschränkungen übertragbar, da die Zwischenlagerung der Rohblöcke, der Betrieb mehrerer Steinbrüche mit ähnlichen geologischen Abfolgen und die Verwendung der Quader an verschiedenen Bauabschnitten die Interpretation verfälschen.

### *Überlegungen zur Herkunft der Kalksteine an der porta praetoria*

Es kann als gesichert gelten, dass zur Erbauung der porta praetoria um 179 n. Chr. Kalksteine aus der unmittelbaren Umgebung und den flussaufwärts gelegenen Tälern verwendet wurden. Die Gründe für diese Annahme klingen trivial: zum einen stand und steht qualitativ hochwertiges Gestein entlang der Flussläufe an, zum anderen war der Transport über die Donau für die römischen Besatzer kein Problem.

Bilanziert man die bisherigen Erkenntnisse und studiert die Geologische Karte, ergeben sich mehrere potenzielle Abbaugebiete, die sich vom Keilberg bei Regensburg über Großprüfening und Bad Abbach bis Kelheim erstrecken (Abb. 35a, b). Weitere Abbauräume befanden sich auf der von den Germanen kontrollierten linken Donauseite, so die unmittelbar im Talniveau anstehenden Kalkfelsen bei Kleinprüfening, Mariaort und Pfaffenstein.<sup>5</sup>

Praktische Überlegungen lassen vermuten, dass man sich zu Beginn des Baus darauf beschränkt haben wird, geeignetes Material in der unmittelbaren Umgebung auf römisch kontrolliertem Territorium zu fördern. Es wäre naheliegend, zunächst die weithin sichtbaren Kalkvorkommen am Keilberg gegenüber der porta praetoria

<sup>5</sup> Das Richtprofil am Keilberg beinhaltet alle unmittelbar um Regensburg anstehenden Kalksteintypen und erlaubt es, im Vergleich zu den an der porta praetoria analysierten Kalksteinen mögliche Herkunftsgebiete in der unmittelbaren Umgebung auszuschließen.

als Rohstoffquelle zu nutzen. Schriftliche Überlieferungen deuten jedoch fast ausschließlich auf die Region um Kapfelberg, das donauaufwärts 10 km von Regensburg entfernt liegt (Abb. 35 b).<sup>6</sup> Diese Diskrepanz ist nicht so ohne Weiteres zu verstehen. Drei gewichtige Gründe könnten für die Ausbeutung weiter entfernt gelegener und die Nutzung mehrere Brüchen entlang der Donau sprechen:

- Das Fehlen eines ausreichenden Angebotes an qualitativ hochwertigem Gestein in der unmittelbaren Umgebung.
- Eine starke Nachfrage und der hohe Materialbedarf für den unter Zeitdruck stehenden Ausbau der Lagermauer.
- Die Kenntnisse der römischen Besatzer über die Rohstoffsituation donauaufwärts.

Indizien für diese Annahme sind u. a. die spezielle geologische Situation am Keilberg sowie das Vorkommen von Grünsandsteinen in der bauzeitlichen Lagermauer. Der carbonatisch gebundene Sandstein ist gemäß der geologischen Abfolge ein Kreidesandstein und findet sich oberhalb der abgebauten Kalksteinschichten. Er kann nur donauaufwärts um Bad Abbach und Kapfelberg gebrochen worden sein.

Aus diesem Grund sind die Vorkommen in dem Gebiet um Matting, Kapfelberg und Kelheim von besonderem Interesse. Gerade am Kapfelberg sind auch heute noch erhebliche Mengen verstürzter Massen anzutreffen, deren Bildung durch die Tektonik oder die antike Abbautechnik verursacht worden sein könnte. Die Gestürze und Rutschungen auf den Halden müssen schnell erfolgt sein. Dies geht nicht zuletzt aus der detaillierten Beschreibung von Hasselmann hervor, der sich als erster Bearbeiter in den Jahren um 1890 intensiv mit den Fragen zum römischen Gesteinmaterial und seiner Herkunft beschäftigte:

*„(...) mehrere große Blöcke, an welchen noch aus altersgrauer Vorzeit Schremmen und Keilbüchsen vorzufinden waren. Ja sogar schon aufgetriebene Blöcke findet man verlassen; ebenso fand sich in der 5. Etage ein großer Block mit eingesetzten Keilen vor. (...) Beim Abbau der alten Schutthalden und des Gestürzes südwestlich bei der Hauptriesel zeigten sich drei total zerdrückte menschliche Skelette, mehrere schwarzgraue germanische Gefäßtheile, welche in ihrem rauhen Bruch mehrere eingemengte kleine Kieselchen zeigten, weiteres fanden sich daselbst alte Werkzeuge. (...) Unter diesem Gestürze fand sich auch ein Stück Ara mit dem fragmentalen Namenszug „Mark Aurel“ nebst einigen römischen Bronze- und Silbermünzen vor. Auch Theile von Terracot. sigult. versehen mit Ornamenten und Thiergestalten wurden unter dem Schutt vereinzelt gefunden. Das Auffinden vorerwähnter menschlicher Skelette läßt muthmaßen, daß diese Unglücklichen durch den rasch erfolgten Bergrutsch aus ihrem etwa tiefer gelegenen Arbeitsschacht nicht mehr ent-rinnen konnten. Ebenso ward die nordöstlich vom Profil 8 gleich hinter der Beladestation der Drahtseilbahn aufgefundene, in Stein gehauene Innschrift mit darunter lagernder Feuerstätte verschüttet“.<sup>7</sup>*

Zur Abbautätigkeit und Qualität der geförderten Steine führt Hasselmann aus:

*„Den Hauptbeweis einer frühzeitigen Massenbewegung aus diesem Berg liefern uns die beträchtlichen ausgedehnten altersgrauen Schutthalden und die bei Wieder-*

<sup>6</sup> Hasselmann (1892).

<sup>7</sup> Ebd.

*beginn des neuen Abbaues anno 1888 im November unter den alten Schutthalden gefundenen sehr alten Werkzeuge. (...) Das zu Hausteinen, wie zu Bildhauerblöcken verwendete Kalksteinmaterial hat die Eigenschaft, vom Bruche frisch entnommen sehr mild und leicht sich bearbeiten zu lassen, jedoch nach Austrocknung der Bruchfeuchtigkeit erhärtet dieses Material sehr rasch an der Luft und nimmt bald eine emailähnliche Krustierung auf seiner Oberfläche an, wie dies besonders an Regensburgs alten Kirchenbauten, vor allem an den so scharfkantig erhaltenen Profilen mit ihrer so leicht bläulich grauen durch Jahrhunderte hervorgebrachten und erzeugten Patina zu ersehen ist und dem Ganzen einen wirklich ehrwürdigen monumentalen Charakter verleiht.*

*Das zeigen das aufgedeckte römische Thor beim Abbruche der alten Karmeliten-Brauerei, wie die Auffindung der römischen Mauer bei Herstellung der Fundamente des Hotel Maximilian und die vielen Hausteinfragmente aus Kalkstein der verschiedenartigsten römischen Arbeiten, gefunden bei Herstellung der Kanalisierungsarbeiten, besonders in der Eichhornstraße zu Regensburg und die bekannte „Porta praetoria“ darselbst.*

*Gewiß stunden die Römer auch noch zur damaligen Zeit, obwohl der Verfall des römischen Reiches sehr nahe, auf einer Stufe des Wissens und Könnens der Baukunst, daß durch wohlbegründete Erfahrungen dieselben zu wählen wußten, welches Hausteinmaterial dem Klima angemessen und eine lange, ja unberechenbare Zeit, wie es die aufgefundenen Baureste zeigen, dem zerstörbaren Einflusse aller Verwitterungsverhältnisse Trotz bieten kann.“*

Zieht man das zerklüftete Gebirge am Kapfelberg und die Abbautechnik mit Abtrutschen und Verladen an der Donau in Betracht, kann man davon ausgehen, dass die erwähnte gute Qualität der Blöcke nur für einen Teil des Materials Gültigkeit besessen haben kann. Unterhalb der Verwitterungszone und in der Nähe der Klüfte wird viel Gestein minderer Qualität angefallen sein, was auch die erwähnten großen Halden belegen mögen.

Dass aber Werksteinquader zur Bauzeit der porta praetoria bei Kapfelberg abgebaut wurden, steht nach der von Hasselmann geschilderten Befundsituation außer Zweifel. Ob es sich bei den verschütteten Personen im Steinbruch allerdings um Römer, Germanen oder Sklaven gehandelt hat und wer für den Betrieb der Steinbrüche verantwortlich war (Römer? Germanen ?), wird sich nicht mehr klären lassen, da die Funde aus dem späten 19. Jahrhundert als verschollen gelten.

Der Transport der Werksteine flussabwärts wird vermutlich ein römisches Privileg gewesen sein, wobei die rege Nutzung des Wasserweges und die Größe des zu bauenden Lagers als indirekte Hinweise auf den Betrieb mehrerer Steinbrüche neben dem von Kapfelberg gelten können. Im Hinblick auf die Bedeutung der römischen Siedlung bei Eining-Unterfeld sei auf die Ausführungen von Dietz und Fischer verwiesen.<sup>8</sup> Beide Autoren merken zu den Steinbrüchen in römischer Zeit folgendes an:<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Dietz und Fischer (1996): „Als erstes Lager in Raethien gilt Eining-Unterfeld, für das zum ersten Mal Indizien für die Anwesenheit der 3 italienischen Legion in den frühen 70er Jahren in Raethien vorliegen; allerdings noch nicht in Regensburg, ihrem späteren Standlager. Die Anlage wurde nach Schönenberger (1968) von einer Erdmauer mit einer Front aus Rasenboden und drei Spitzgräben auf drei Seiten umgeben; die Westseite zur Donau hin schien offen gewesen zu sein. Tore und Türme der Befestigung sind nicht bekannt. Von der inneren Struktur sind bisher nur Steinbauten zum Vorschein gekommen. Eining-Unterfeld ist recht sicher zwischen 172

„Die Zahl der römischen Steinbrüche wird meist unterschätzt. Die Regensburger Legion muß entlang der Donau, jedenfalls von Eining bis Prüfening, eine ganze Kette von Brüchen ausgebeutet haben. In diesem Gebiet stehen sowohl die Massenkalksteine wie die Reinhausener Sandsteine neben- bzw. übereinander an. Die Auffindung römischer Steinbrüche ist nicht nur der allgemeinen Datierungsproblematik von Brucharbeiten wegen, sondern vor allem dadurch erschwert, weil diese in ihrem eigenen, oft mehr als 50 % betragenden Abfall erstickten; außerdem ist z. B. mit der Möglichkeit zu rechnen, dass sie im Mittelalter und Neuzeit weiterbenutzt wurden.“

Um die erhaltenen objektiven Belege zur Herkunft der Kalksteine an der porta praetoria darzustellen, werden nach einer allgemeinen Einführung zur Bildung von Kalksteinen im Allgemeinen und den Sedimenten des Oberjura im süddeutschen Raum im Besonderen, die Aufschlüsse in der Umgebung von Regensburg behandelt. Dabei nimmt das Richtprofil am „Keilberg“ eine Schlüsselposition ein. An diesem Ort sind alle im geologischen Profil übereinander vorkommenden Kalksteintypen vertreten. Ferner werden weitere Vorkommen donaufwärts vorgestellt, die potenziell für einen Abbau geeignet gewesen wären. Hier ist besonders der Steinbruch von Unterirading zu erwähnen, in dem ein halbfertiger römischer Altar gefunden wurde und der deshalb als möglicher Steinbruch geführt wird.

(Zerstörung von Regensburg Kumpfmühle) (wahrscheinlich 162) und 179 (Fertigstellung des Regensburger Legionslagers) zu datieren. Das Lager wird als Operationsbasis gesehen, von der aus römische Truppen aus dem böhmischen Raum in die Provinz Raethien eingefallene Gegner wieder vertrieben. Eine Abteilung kann man vermutlich in Alkofen (zwischen Saal und Bad Abbach) lokalisieren. (...) Das Lager von 179 in Regensburg bot sich äußerlich fast als reine Sandsteinfestung dar. Nur seine Tore waren nach Gesteinsuntersuchungen an der Porta Praetoria aus Diceraskalk (Malm oder Weißer Jura) hergestellt, der im Volksmund Kelheimer Marmor genannt wird, wie sie im fränkischen Jura und auch südlich der Donau besonders zwischen Bad Abbach und Eining vorkommen.

<sup>9</sup> ebd.: „Natürlich ist es schwer, ja fast unmöglich, die Arbeitsleistung der römischen Brüche zu bestimmen. Für den mittelgroßen Bruch der Mainzer Legion am Kriemhildenstuhl wurde berechnet, dass seine rund 20000 m<sup>3</sup> Gesamtergiebigkeit von vier Arbeitern bei 250 Arbeitstagen im Jahr in etwa 15 Jahren gebrochen worden sein könnte. Die wesentlichen Arbeitsgänge waren Abdecken, zeitraubendes Schrotten (Aushauen schmaler Gräben), Abspalten durch das Einschlagen eiserner Keile in die Schalrinnen und Abkippen der Blöcke mit Brechstangen von der Basis her. Die nötige Bearbeitung an Ort und Stelle – die aus ihrer ursprünglichen Lage entfernten Rohblöcke wurden grob rechtwinklig zubehauen (vorbossiert) – nahm noch einmal soviel Zeit in Anspruch. Anschließend wurden die Rohquader auf schlittenähnlichen Rutschen zu Tal gelassen. Stein bis zu zehn Tonnen hätten zwar noch auf Karren weggeschafft werden können, doch wird man, wo immer es ging, die Donau als Transportweg bevorzugt haben. Erst an der Baustelle selbst wurden die Rohlinge in ihre endgültige Form gebracht. Fraglos boten die Hänge beiderseits der Donausüdwestlich von Regensburg und die Flussterrasse am Nordknie in den siebziger Jahren des 2. Jahrhunderts den Anblick einer Großbaustelle. Ist auch die genaue Arbeitsdauer nicht im entferntesten abzuschätzen, so wird ein Ansatz von fünf oder eher mehr Jahren kaum zu hoch gegriffen sein. Selbstverständlich kommandierte man, unter der Aufsicht eines Centurios, vor allem Soldaten von ihren Einheiten in die Brüche ab. Unermüdlich waren Hammer und Meißel dort tätig, um den enormen Bedarf zu decken. Dabei musste, dies nur noch zu Illustration der enormen Arbeitsleistung, des großen Schuttanfalls wegen in den Brüchen mindestens die doppelte Steinmenge also über 60000 m<sup>3</sup> – bewegt werden. Aus allen Himmelsrichtungen schaffte man Hau- und Bruchsteine, Kies, Lehm, Kalk und Pech, Holz, Ziegel, Dachsparren und Gips zur Baustelle, wo Architekten, Steinmetze und Maler eifrig tätig waren, unterstützt von Hebekränen (Flaschenzügen) und Transportmaschinen.“

## 2 Anmerkungen zur Bildung von Kalksteinen

### *Carbonatsedimente und der Faziesbegriff*

Die Bildung von Kalksteinen und Carbonatsedimenten, wie sie in den nächsten Kapiteln am Beispiel der Carbonatsande des Malm und der damit vergesellschafteten „Riffbildung“ ausgeführt wird, findet überwiegend in den flachen Bereichen der Meere (flachmarin) statt. Dabei wird die Sedimentation von den Wellenbewegungen und Strömungsverhältnissen bestimmt, die unter dem Oberbegriff der Wasserenergie subsumiert werden: die Wasserenergie ist umso größer, je stärker die Wellenbewegung und Strömung an einem Ort sind.<sup>10</sup>

Über die Zusammensetzung der Kalke entscheidet nicht zuletzt die Menge und Art an feinsten Verwitterungsprodukten, die aus der Umgebung eingetragen werden. Sie übernehmen eine wichtige Funktion, denn abhängig von dem Eintrag und seinem Mengenverhältnis zum Carbonatgehalt ergeben sich in einem bestimmten Ablagerungsraum entweder reine Kalke, tonige Kalke oder Mergel. Der Eintrag besteht vorwiegend aus Sand, Silt und Ton,<sup>11</sup> wobei die Silt- und Tonfraktion die weiträumigste Verbreitung erreicht und aufgrund ihrer Korngröße vorwiegend in den niederenergetischen Sedimentationsgebieten zusammen mit feinstem Calciumcarbonat (Mikrit, Korngröße < 4 µm) abgelagert werden. Generell werden die Verwitterungsprodukte in Carbonatgesteinen als „Nichtcarbonate“ oder „unlöslicher Rückstand“ bezeichnet.

Die Verteilung der Nichtcarbonate stellt die Grundlage für die Mineralostratigraphie dar.<sup>12</sup> Ihr Anteil und ihre mineralogische Zusammensetzung steuern die Farbe und die technischen Eigenschaften von Carbonatgesteinen (Verwitterung, Festigkeit, Brennverhalten). Sie sind es, die letztlich für den Farbwechsel der Kalksteine durch Brandeinwirkung an der porta praetoria verantwortlich sind und die thermisch induzierte Phasenumwandlung hellbrauner in dunkelrote Verbindungen unmittelbar anzeigen.

Gemäß der gültigen Klassifikation der Carbonate nach Dunham,<sup>13</sup> wird der Zusammenhang zwischen der Wasserenergie im Ablagerungsraum und den Matrixgehalten sowie den damit gekoppelten Gehalten an „Nichtcarbonaten“ im Gesteinsnamen angezeigt (Abb. 36). Es haben sich folgende Bezeichnungen eingebürgert, die keine deutschsprachigen Äquivalente haben:

- *Mudstones* und *Wackestones*.<sup>14</sup> Sie weisen ein sogenanntes schlammgestütztes Gefüge aus feinkristallinem Calciumcarbonat auf (Mikrit, schwarz markiert) und werden unter geringer Wasserenergie abgelagert („mud-supported fabric“). Der Anteil an größeren Komponenten liegt für *Mudstones* unterhalb, für *Wackestones* oberhalb von 10 %.

<sup>10</sup> Die Unterschiede in der Wasserenergie sind eine Erfahrung, die jedem Badeurlauber geläufig sind, der einmal die Strände des adriatischen Teutonengrills (sehr niedrige Wasserenergie) mit den Westküsten des atlantischen Winterdomizil auf den Kanarischen Inseln vergleichen konnte (unvergleichlich höhere Wasserenergie).

<sup>11</sup> Quarz, Feldspat und die Tonminerale Illit, Muscovit, Kaolinit, Chlorit, Montmorillonit.

<sup>12</sup> Nach Bausch (1980).

<sup>13</sup> Dunham (1962).

<sup>14</sup> mud (engl.): Schlamm, Matsch, auch: Morast.

- *Packstones*<sup>15</sup> werden in Bereichen mäßiger Wasserenergie abgelagert und besitzen noch Reste mikritischer Matrix, die nicht ausgewaschen wurden.
- *Grainstones*<sup>16</sup> werden in Bereichen mit hoher Wasserenergie abgelagert (submarine Sandbarren). Sie bestehen zunächst nur aus Komponenten (Carbonatkörner, Bruchstücke von Organismen, Pelloide, Ooide, etc.)<sup>17</sup>, die einen lockeren Sand mit einem korngestützten Gefüge bilden („grain-supported fabric“).
- *Boundstones*<sup>18</sup> weisen häufig ein Gerüst auf und sind durch biogene Carbonatproduktion gebildet worden (Korallen, Algen, Serpuliden, etc.), die, abhängig vom Organismenotypus, in unterschiedlichen Wassertiefen entstehen können.

Die Interpretation der Massenkalk als Carbonatsande (*Packstones*, *Grainstones*), die man eindeutig von Schwamm-Algen-Bildungen (*Boundstones*) und von *Mudstones* und *Wackestones* unterscheiden kann, ermöglicht ein völlig neues Verständnis für die Gesteinsausbildung in den Kalken des Malm. Sie erlaubt es, rezente Sedimente, deren Bildung heute beobachtet werden kann, für die räumliche Verteilung fossiler Gesteinsqualitäten und Kalksteintypen heranzuziehen.<sup>19</sup>

Eng verbunden mit den genannten Klassifikationen ist der Begriff der „Fazies“. Die erste und noch immer gültige Definition stammt von Gressly (1838):

*„Jede Facies einer Ablagerung zeigt wohlumrissene Eigenheiten petrographischer, geognostischer und paläontologischer Art, die im klaren Gegensatz zu den Eigenheiten eines anderen Faciesbereiches im gleichen geologischen Niveau stehen ...“*

„Fazies“ meint also die Summe der anorganischen und organischen Merkmale von Sedimentgesteinen, die zur gleichen Zeit an verschiedenen Orten abgelagert wurden. Merkmale können beispielsweise die Korngröße, die Sortierung der Körner oder Fossilreste sein. Der notwendige Untersuchungsmaßstab und die Untersuchungsmethodik liegen aufgrund der geringen Größe der Gesteinskomponenten in der Regel im Mikrobereich. Aussagen über Faziestypen beziehen sich deshalb auf Proben im Zentimetermaßstab, weshalb man auch von „Mikrofazies“ spricht.<sup>20</sup>

### *Carbonatsedimente und Porenraum*

Bei Kalksteinen tritt bereits in primären Carbonatsedimenten ein inhomogenes Porensystem auf, das sich aus unterschiedlichen Porentypen zusammensetzt (Abb. 37) und sich im Laufe der Früh- und Spätdiagenese erheblich verändern kann. So können Porenräume sowohl verschlossen als auch wieder geöffnet werden, was durch eine Verschiebung des Carbonatgleichgewichtes, das während der Genese von Kalksteinen wiederholt Lösungs- und Fällungsprozesse bewirkt, ermöglicht wird.

<sup>15</sup> pack (engl.): Pack, Ballen; auch: Päckchen.

<sup>16</sup> grain (engl.): Korn, Körnchen; auch: Maserung.

<sup>17</sup> Pelloide: Schlämme (griech. Pelos, Schlamm, Lehm); Ooide: kugelförmige Mineralkörner (griech. eiförmig).

<sup>18</sup> bound (engl.): „gebunden“.

<sup>19</sup> Dies hat auch Auswirkungen auf das Verständnis von primären und sekundären Porentypen und Porensystemen in Malm-Carbonaten, was sowohl in der Bausteinindustrie, in der Kalkindustrie sowie auch bei den hier anstehende Fragen des Vergleichs von Kalken mit deren möglichen Herkunftsort von Bedeutung ist.

<sup>20</sup> Nach Flügel (1982).

Die verschiedenen Porentypen sind unterschiedlich miteinander vernetzt. In Resten von Organismen treten relativ hohe Anteile sogenannter Totporen auf, die im Gegensatz zu Nutzporen (effektive Porosität) von Flüssigkeiten unter Normalbedingungen nicht erreicht werden. Dies ist der Grund, warum bei Kalksteinen oft keine positive Korrelation zwischen der Gesamtporosität und der Permeabilität besteht, wie es beispielsweise bei Sandsteinen der Fall ist, die überwiegend über sogenannte intergranulare, den Feuchtetransport steuernde Poren verfügen.

Man unterscheidet zwischen primären Poren (vom Gefüge abhängig) und sekundären Poren (vom Gefüge unabhängig).<sup>21</sup> Sekundäre Poren entstehen vorwiegend durch diagenetische Prozesse. Sie lassen sich in Interkristallporen, die häufig in zuckerkörnigen Dolomiten anzutreffen sind, Partikellösungsporen (isolierte Poren in mikritischer Matrix) und Gesteinslösungsporen sowie Kavernen (Verkarstung) differenzieren.

Die wichtigsten primären Poren befinden sich zwischen den Komponenten (Ooiden, Fossilbruchstücke, etc.) und werden Interpartikelporen genannt. Bedingt durch die unterschiedliche Form von Komponenten können beispielsweise Schirm-poren unter Muscheln auftreten, während in Riffen je nach Organismus Gerüst-poren überwiegen. Zusätzlich kommen innerhalb von Fossilkammern Intrapartikelporen vor.

Die Kombination von primären Poren führt zu einer Ausgangsporosität der Carbonatsedimente bis zu 70 %. Das unterscheidet sie drastisch von den Sandsteinen, die eine maximale Porosität von 42 %, dafür aber ausschließlich Intergranularporen aufweisen.

### *Der Begriff der Diagenese*

Unter „Diagenese“ werden alle chemischen und mechanischen Prozesse zusammengefasst, die das Sediment von seiner Ablagerung bis zum Eintritt in die Metamorphose verändern. Diagenetische Vorgänge wirken bereits unmittelbar nach der Ablagerung, weiterhin während der Versenkung in tiefere Schichten sowie nach dem tektonischen Wiederaufstieg zur heutigen Oberfläche und der dort stattfindenden Verkarstung.

In Carbonatsedimenten setzt häufig nach der Ablagerung eine frühe Diagenese ein, die eine Zementation des Gefüges oder dessen Lösung zur Folge haben kann und von den physikochemischen Bedingungen im Ablagerungsraum kontrolliert wird.<sup>22</sup> Dabei werden auf chemischem Weg meist allseitige Zemente aus Aragonit und Magnesiumcalcit gebildet, die zu einer ersten Verfestigung führen. Die weitere Zementation kann unter marinen oder meteorischen Bedingungen und in verschiedenen Stadien während der Versenkungsdiagenese eintreten. Es können körnige (granulare), großflächige (poikilotopische) und andere Zementtypen gebildet werden, die letztlich einen dichten Kalkstein entstehen lassen.

Bei der mechanischen Diagenese (Kompaktion während der Versenkung) tritt ferner eine ständige Änderung des Korngefüges und eine Abnahme der Porosität und Permeabilität ein. Andere Phänomene, wie die Drucklösung (Stylolithen) sind wichtig für die (bau-) technischen Eigenschaften von Sedimentgesteinen, weil sie gleichermaßen Trennflächen und Permeabilitätsbarrieren sein können. Ihre Ausbildung

<sup>21</sup> Nach Choquette & Pray (1970).

<sup>22</sup> Diese können marin, meteorisch, phreatisch oder vados sein.

wird durch den Gehalt an Nichtcarbonaten (Tonminerale) bereits ab Anteilen von etwa 2 % stark begünstigt.

Die Veränderungen auf dem Weg vom Sediment zum Sedimentgestein sind zum großen Teil von den frühesten Bildungsbedingungen im Ablagerungsraum bestimmt. Der primärfazielle Einfluss wird mit zunehmendem Umwandlungsgrad schwächer, sein Wirken ist somit immer schwerer nachzuweisen.

### 3 Der Malm in Süddeutschland

#### *Eine kurze Einführung*

Geologisch gesehen ist der Malm (Weißjura, Oberjura) eine Abteilung des Jura und umfasst den Zeitraum von 144–163 Mio Jahren vor unserer Zeit. Mit Beginn des Malm wurde das sogenannte Vindelizische Land überflutet, das ein Festland war, welches den heutigen Alpen vergleichbar und in etwa dort gelegen ist. Dabei entstand ein flaches Epikontinentalmeer am Nordrand der sogenannten „Tethys“, das im Norden an die Mitteldeutsche Schwelle und im Osten an das Böhmisches Massiv angrenzte. Nach Süden ging es in die Jura-Ablagerungen der „Penninischen Tröge“ über (Abb. 38).<sup>23</sup>

Die Fränkischen Kalksteinfazies sind der nordöstlichste Teil der oberjurassischen Ablagerungen in diesem Epikontinentalmeer. Sie waren durch „Schwamm-Riff-Barrieren“ in drei Ablagerungsräume unterteilt und von dem westlich anschließenden Schwäbischen Jura getrennt. Heute stellen die jurassischen Sedimente, die an der Oberfläche aufgeschlossen sind, nur einen kleinen Teil der Gesteine des Jura in Süddeutschlands dar.<sup>24</sup>

Die Sedimente des Malm weisen eine Mächtigkeit von mehr als 500 m auf.<sup>25</sup> Man unterscheidet zwei charakteristische Faziestypen:<sup>26</sup>

- a) die sogenannte „Normalfazies“ (Bankfazies), und
- b) eine „Riff-Fazies“ (Massenkalke).<sup>27</sup>

Dabei besteht die weitaus dominierende Normalfazies aus einer gebankten Wechselfolge von Kalken und Mergeln, deren systematischer Wechsel sich über weite Bereich korrelieren lässt („Stromatometrie“).<sup>28</sup> In dieser Normalfazies treten die für

<sup>23</sup> Unter den Nördlichen Kalkalpen fehlten bisher Informationen über den Übergangsbereich zwischen den Schwäbischen und Südlichen Fränkischen Sedimentationsgebieten und den tiefmarinen Ablagerungen des Nördlichen Penninischen Troges. Erst neue Tiefbohrungen im Bereich der Nördlichen Kalkalpen erlauben es, die Faziesentwicklung viel weiter nach Süden zu extrapolieren (z. B. Bohrung Grünau). Es zeigt sich, dass die Sedimente die etwa 50 km südlich der Grenze der Nördlichen Kalkalpen in etwa 5000 m Teufe erbohrt wurden, faziell den Faziestypen des Malm der Südlichen Fränkischen und der Schwäbischen Alb entsprechen (Koch 1997), wie sie von Koch et al. (1994) definiert wurden.

<sup>24</sup> Aufgrund der alpinen Tektonik ist der südliche Teil der Süddeutschen Scholle im Molassebecken eingetieft und am Nordrand der Alpen von den alpidischen Decke zum Teil überschoben.

<sup>25</sup> Zit. nach Meyer & Schmidt-Kaler (1990).

<sup>26</sup> Kalksteintyp und Faziestyp sind nach der neuen Sprachregelung synonyme Begriffe.

<sup>27</sup> Nach Gwinner (1971), Wagenplast (1972), Keupp et al. (1990), Meyer & Schmidt-Kaler (1990), Leinfelder et al. (1994).

<sup>28</sup> Siehe v. Freyberg (1966). Die messbaren Tongehalte wurden von den umliegenden Fest-

die stratigraphische Untergliederung des Malm wichtigen Ammoniten und andere biogene Komponenten auf.

Die stratigraphische Untergliederung des Malm beginnt mit dem Malm-Alpha und endet mit dem Malm-Zeta. Nach sedimentologischen Untersuchungen wurde im Malm-Alpha vorwiegend Mergel abgelagert. Erst im Malm-Beta begann die Ausbildung wohlgebankter Kalke (Werkkalke) und das Wachstum von überwiegend kleinen Schwamm-Krusten-Vergesellschaftungen (Riffen). Bereits im Malm-Gamma nahm das Riffwachstum immer größere Areale ein, um im Malm-Delta seine größte Ausdehnung in Form so genannter Schwamm-Algen-Riffe zu erreichen, die später häufig dolomitisiert und auch wieder dedolomitisiert wurden. Die „Riff-Fazies“ soll sich aus Algen und Schwämmen entwickelt haben.<sup>29</sup> Ammoniten sind hier aber nur selten zu finden. Im Malm-Epsilon und Malm-Zeta kam es wieder verstärkt zur Bildung von gebankten und besonders plattigen Kalken zwischen den nun höher aufragenden Schwammriffen, die, gewissermaßen „Schüsseln“ (Wannen) gebildet haben.

Die an Ort und Stelle entstandene Schwammfazies tritt überwiegend in zwei Formen auf: als massige, sogenannte Schwammstotzen („Bioherme“)<sup>30</sup> oder als dickbankige Schwammkalke („Biostrome“). Dabei weisen die Dimensionen und die Zusammensetzung der „Riff-Fazies“ erhebliche Unterschiede auf.<sup>31</sup> So treten in den an Kieselschwämmen reichen Zentren der Bioherme andere Fossilien als Schwämme völlig in den Hintergrund. An den Rändern und in Biostromen ist dagegen in der Regel eine reiche Begleitfauna zu finden.<sup>32</sup> Diese auffallenden Unterschiede in der Verteilung der Organismen können erst mit dem neuen Faziesmodell der Massenkalken erklärt werden.<sup>33</sup>

ländern eingetragen. Sie stellen die Grundlage für die von Bausch (1980, 1987) angewandte Mineralostratigraphie dar.

<sup>29</sup> „Algen“ sind mikrobielle Krusten und Krusten auf der Basis von Cyanobakterien. Siehe hierzu auch Gwinner (1971).

<sup>30</sup> Nach Roll (1934).

<sup>31</sup> Die Mikrofazies der authochthonen Schwammriffe wird von zahlreichen Autoren beschrieben. Siehe hierzu Fritz (1958), Geyer (1962), Hiller (1964), Wagenplast (1972), Nitzopoulos (1974), Meyer (1975, 1977), Flügel & Steiger (1981), Schorr & Koch (1985), Wirsing & Koch (1986), Kott (1989), Koch et al. (1994).

<sup>32</sup> Siehe hierzu Meyer (1975) und Hiller (1964).

<sup>33</sup> Nach Koch et al. (1994). Zu ergänzen ist, dass die bathymetrische Stellung der oberjurassischen „Schwamm-Riffe“ bis heute strittig ist, da die mutmaßliche Wassertiefe des aktiven Schwammwachstums nach unterschiedlichen Kriterien ermittelt wurde. Eine umfassende Diskussion hierzu liefern Keupp et al. (1990) und Leinfelder et al. (1994). Je nach der stratigraphischen Position und Interpretation wird eine Wassertiefe im Bildungsraum zwischen 0 m und 200 m diskutiert. Während für die meist isolierten „echten Schwamm-Krusten-Riffe“ des Malm-Alpha bis Malm-Gamma, die häufig in mergeliger Fazies auftreten, ein tieferer Ablagerungsraum allgemein vorzuliegen scheint, müssen besonders die Massenkalken des Malm-Delta bis Malm-Zeta wesentlich differenzierter betrachtet werden. Beachtenswert ist, dass auch Autoren, welche die „Schwammriffe“ generell in einen Bildungsraum mit größerer Wassertiefe positionieren, in dem die Anwesenheit von Ooiden, die flaches Wasser anzeigen würden, nicht möglich erscheint, diese Vergesellschaftung im obersten Jura besonders im Raum Kelheim-Regensburg durchaus beschreiben. Hier lässt wohl die Tatsache, dass sich das Meer gegen Ende des Malm aus dem süddeutschen Raum zurückgezogen hat, eine andere Schlussfolgerung zu. Interessanterweise wird der Umkehrschluss, dass daher auch die sogenannten Massenkalken des Malm-Delta und des Malm-Epsilon nicht allein aufgrund des Vorhandenseins von Schwämmen in tieferem Wasser abgelagert worden sein müssen, nicht gezogen.

## Der Malm der Frankenalb

Die Fränkische Fazies des Malm wird in einen nördlichen, mittleren und südlichen Faziesbereich untergliedert, welche durch sogenannte „Riff-Schranken“ voneinander getrennt gewesen sind.<sup>34</sup> Danach befand sich der heutige Nordteil der Fränkischen Alb zur Zeit des Oberjura in einem der mergeligen Schwäbischen Fazies ähnlichen Becken. Allerdings kann die Sedimentation ebenso gut mit natürlichen Gesetzmäßigkeiten erklärt werden, wie sie heutzutage in flachen marinen Gebieten mit Carbonatsedimentation vorherrschen.<sup>35</sup>

### Zur Diskussion um den Malm der Südlichen Frankenalb

In der Südlichen Frankenalb sind aufgrund der leichten Kippung der Süddeutschen Scholle nach Südosten die mächtigsten vollständigen Profile des Malm erschlossen. Von großer bautechnischer Bedeutung sind dabei die Plattenkalke des Malm-Zeta, die auch Solnhofener Plattenkalk genannt werden, und in Wannen zwischen Schwammriffzügen gebildet worden sein sollen. In ihnen fand sich u. a. der berühmten Urvogel *Archaeopteryx*.<sup>36</sup>

Für die Diskussion der Kalke an der porta praetoria sind die als Treuchtlinger Marmor (Abb. 39) bekannten, bis zu 60 m mächtigen Schichten des Malm-Delta und die jüngsten Schichten des Malm-Epsilon und Malm-Zeta von besonderem Interesse (Abb. 40). Der Treuchtlinger Marmor besteht aus charakteristischen, wohl gebankten „Schwamm-Biostromen“. <sup>37</sup> Für das Material typisch sind die zahlreichen weißen „Flämmchen“, bei denen es sich um sogenannte Tubiphyten handelt, die eine Symbiose aus Foraminiferen und Algen sind.<sup>38</sup> Die Bänke des Gesteins sind aus zwei, sich auf engstem Raum verzahnenden Hauptfaziestypen aufgebaut.<sup>39</sup> Es sind dies:

- a) die matrixreichen Carbonatsande (bioklastische Wackestones),<sup>40</sup> und
- b) die Carbonatsandfazies mit Algenmatten (Peloid-Krusten-Fazies).<sup>41</sup>

Generell liegen Partikelkalk-Fazies vor, die durch dünne mikrobielle Matten verfestigt sind und unterschiedliche Matrixanteile aufweisen.<sup>42</sup> Vergleichbare Sedi-

<sup>34</sup> Siehe Zeiss (1977), Meyer & Schmidt-Kaler (1993).

<sup>35</sup> Bahamas, etc; zur Diskussion der Riff-Schranken siehe Koch et al. (2003).

<sup>36</sup> Barthel (1964), Keupp (1977), Viohl (1983, 1998).

<sup>37</sup> Nach Meyer (1975).

<sup>38</sup> *Tubiphytes morronensis Crescenti*; zit. nach Flügel (1981).

<sup>39</sup> Siehe Kott (1989).

<sup>40</sup> Sie stellen ein weiches allochthones Sediment dar. Intraklasten von Millimeter- bis Zentimeter-Größe treten an der Basis und am Top der Bänke auf. Ammoniten sind schichtparallel eingelagert.

<sup>41</sup> Sie baut sich aus vielen Peloiden, Onkoiden, Tubiphyten und stromatolithischen Bindstone-Bildungen auf und wird als autochthone Hartgrundfazies interpretiert, die durch mikrobielle Matten, frühere „Algenmatten“, charakterisiert ist. Schwämme werden lokal in Lebendstellung gefunden. Ferner auffallend sind große Wachstumshohlräume, die mit grobem Calcit (Sparit) gefüllt sind.

<sup>42</sup> Kott (1989) liefert auch eine neue Interpretation der Position der den Treuchtlinger Marmor umgebenden Riffe. Gemäß der Darstellung von Mayer (1981) ist die Plattform des Treuchtlinger Marmors an drei Seiten von Riffen umgeben. Die Riffe befinden sich an den Flanken der Plattform im Übergangsbereich zum Becken. Die zunehmende Wassertiefe ließ das

mente werden am Dohlenfels bei Konstein in der südlichen Fränkischen Alb angetroffen, an welchem Schichten vom Malm-Delta bis Malm-Zeta-1 aufgeschlossen sind.<sup>45</sup> Es sind Riffkalke, die sich mit der dolomitischen Dickbankfazies des Malm-Epsilon verzahnen. Untersuchungen haben ergeben, dass es sich bei dem Massenkalk des Dohlenfelsens um eine bioklastische Carbonatsand-Fazies handelt, die lagenweise unter wechselnder Wasserenergie sedimentiert wurde und in die lokal Schwammriffe eingelagert sind.<sup>44</sup>

Für die Südliche Frankenalb zeigt sich in weitaus stärkerem Maße als für die Nördliche Frankenalb, dass die Massenkalke und die Treuchtlinger Fazies überwiegend Partikelkalk-Fazies mit biogenen Komponenten sind (Carbonatsande, Peloid-Lithoklast-Fazies). Alle diese Beobachtungen lassen sich mit dem neuen Faziesmodell der Genese von Massenkalken der Schwäbischen und Fränkischen Alb erklären.<sup>45</sup> Aufgrund der neuen Daten ergibt sich ein Modell für die Genese der Massenkalke, das dem der heutigen Carbonatsedimente bei flachmarinen Bildungsbedingungen annähernd entspricht. Dies bedeutet, dass sedimentologische Entwicklungen innerhalb eines Profils erkannt und lateral korreliert werden können.

Aus diesem Grund können mikrofazielle Untersuchungen innerhalb eines vertikalen Profils zur Identifizierung charakteristischer Kalksteintypen beitragen (Mikrofaziestypen), die in einem bestimmten Gebiet und/oder stratigraphischen Niveau abgebaut worden sind. Die neuen Erkenntnisse der Erforschung der Malm-Carbonate eröffnen daher die Möglichkeit, die an der porta praetoria analysierten Kalke mikrofaziell einzuordnen und aufgrund dieser Zuordnung realistische und differenzierte Überlegungen über ihre mögliche Herkunft und die Lage der römischen Steinbrüche anzustellen.

### Beschreibung des Malm der Südlichen Frankenalb

Die als Massenkalke bezeichneten Gesteine haben einen wesentlich komplexeren faziellen Aufbau als bisher angenommen. Es handelt sich nur zu einem geringen Teil um Schwamm-Algen-Riffe.<sup>46</sup> Damit erhalten die Beschreibungen in

Wachstum von Schwamm-Algen-Riffen zu. Im Gegensatz zur Annahme von Meyer (1981) lässt Kott (1989) diesen umgebenden Riffen keine Schutzfunktion zukommen, da sie sich nicht über den Meeresboden des Treuchtlinger Marmors erhoben haben. Sie stellen vielmehr Hangbesiedlungen dar.

<sup>43</sup> siehe hierzu Koch (1997), Zeiss (1964) und Meyer & Schmidt-Kaler (1984).

<sup>44</sup> Dies wurde auch an anderen Stellen der südlichen Frankenalb nachgewiesen; siehe hierzu Koch (1997) sowie Blank (1998), Heckert (1997), Heeren (1997), Wehner (1998). An nicht biogenen Komponenten treten vorwiegend Peloid- und Intraklasten sowie oft wechselnde Anteile von Ooiden auf. Biogene Komponenten sind Bruchstücke von Bivalven, Echinodermen, *Terebella lapilloides* und wenige Bryozoen, Gastropoden, Filamente und kleine benthonische Foraminiferen. Derartige Karbonatsande (Packstones – Grainstones) mit charakteristischen Zementen, durch welche sie früh verfestigt wurden, werden in Gebieten heutiger Carbonat-sedimentation im flachmarinen Bereich angetroffen (z.B. Bahamas).

<sup>45</sup> Siehe Koch et al. (1994). Im Laufe der letzten 15 Jahre wurden eine Reihe von Untersuchungen zur faziellen und diagenetischen Entwicklung, also zur gesamten von den frühesten Bildungsbedingungen im oberjurassischen Ablagerungsraum gesteuerten Genese von Malm-Carbonaten durchgeführt. Innerhalb des DFG-Schwerpunktprogrammes „Biogene Sedimentation. Riff-Evolution und Kreide-Sedimentation“ arbeitete eine Gruppe von Malm-Forschern intensiv an Fragen der Genese von „Schwamm-Algen-Riffen“ (Spongiolithen), wie die Massenkalke des Malm bisher allgemein undifferenziert genannt wurden.

<sup>46</sup> Koch et al. (1994).

den geologischen Karten des Untersuchungsgebietes einen anderen Stellenwert und sollten überarbeitet und neu interpretiert werden.<sup>47</sup> Denn gemäß den neuen Erkenntnissen bildet eine Carbonatsand-Fazies den überwiegenden Anteil der Massenkalksteine, die von Peloiden, Lithoklasten und Ooiden geprägt ist und deren Ränder verstärkt durch Schwamm-Krusten-Bildungen und begleitende Faunen besiedelt sind (Abb. 41).<sup>48</sup>

- Dabei machen *Peloid-Lithoklast-Ooid-Packstones mit Grainstone-Lagen* den größten Teil aus. Es handelt sich um weit verbreitete Partikelkalksteine, die sich bei einer Mächtigkeit bis zu 200 m (Malm-Delta bis Malm-Zeta) lateral von einigen 100 Metern bis zu 15 km erstrecken können. Sie bestehen aus geringmächtigen (im Zentimetermaßstab), gelegentlich schwach schräg geschichteten Sedimentationseinheiten und können deutlich voneinander getrennte Wechselagerungen von feinen (an Peloiden reichen bis mikritischen) mit sehr groben Lagen (Grainstones) aufweisen. Die Carbonatsande wurden in Zeiten geringer Sedimentationsraten durch mikrobielle Krusten fixiert.<sup>49</sup>
- *Algen-Schwamm-Mudmounds*<sup>50</sup> können innerhalb der Carbonatsandfazies in unterschiedlicher Größe vorkommen (1 m bis 3 m vertikal; bis zu 10 m horizontal).<sup>51</sup>
- *Algen-Schwamm-Boundstones* mit vielen mikrobiellen Krusten und auch Serpeln, die gelegentlich kleine Kolonien bilden, treten fast ausschließlich an den Flanken der Carbonatsand-Fazies gegen angrenzende Becken mit gebankter bzw. mergeliger Fazies auf. Die Krusten haben das Sediment lokal fixiert und somit die Voraussetzung für die Besiedlung mit anderen Organismen geschaffen.<sup>52</sup>
- *Brachiopoden-Schwamm-Algen-Mounds*<sup>53</sup> treten am Top der „Massenkalksteine“ an den Flanken von internen Rinnen des Malm-Zeta-1 auf. Große Brachiopoden (Terebratuliden) sind in Mikrit eingebettet und werden oft in großer Individuenzahl in Arealen von mehreren Metern gefunden.
- *Schwamm-Algen-Mounds*<sup>54</sup> in Mergelrinnen weisen eine interne Zonierung auf. Andere Mounds zeigen allerdings einen homogenen, noch nicht näher entschlüsselten Aufbau.

<sup>47</sup> nach Bauberger et al. (1969), Rutte (1962).

<sup>48</sup> Diese neue Interpretation basiert auf zahlreichen Arbeiten: Koch (1981–1985), Wirsing & Koch (1986), Below (1988), Kott (1989), Meder (1989), Pomoni-Papaioannou et al. (1989), Liedmann & Koch (1990), Becker (1991), Koch (1994), Dimke (1997), Schauer (1998), Koch & Senowbari (2000).

<sup>49</sup> Die Fazies geht lateral in mikritische und mergelige Sedimente der Normalfazies über, die in eingetieften Becken zwischen Carbonatsand-Arealen abgelagert wurden, von denen sie meist durch eine Zone von Algen-Schwamm-Boundstones getrennt sind. Innerhalb der Carbonatsandfazies können dichte mikritische Partien auftreten.

<sup>50</sup> Algen-Schwamm-Mudmounds: schlammreiche Hügel mit Algen und Schwämmen.

<sup>51</sup> Einschaltungen von linsenförmigen Schwamm-Algen-Mounds mit mikritischer bis pelletoider Matrix wurden vermutlich in Depressionen innerhalb der Carbonatsandfazies abgelagert, in denen sich Schwämme aufgrund verminderter Bodenströmung ansiedeln konnten.

<sup>52</sup> Häufig sind hier Serpeln, Brachiopoden und *Terebella lapilloides* Münster vertreten. Erhöhte Tongehalte im Verzahnungsbereich mit den Beckensedimenten sind für die hier zahlreichen Styrolithen verantwortlich. Ferner sind Dolomit, Dedolomit und Verkieselungen anzutreffen.

<sup>53</sup> Brachiopoden-Schwamm-Algen-Mounds: Erhebungen besiedelt mit Brachiopoden und Schwämmen.

<sup>54</sup> Siehe Schorr & Koch (1985).

– *Nodulare Schwamm-Algen-Mudmounds* innerhalb einer mergeligen Beckenfazies sind meist aufgrund des höheren Tongehaltes, der lokalen Carbonatproduktion („Verwesungsfällungskalk“) und der Kompaktion knollig ausgebildet und können neben Schwämmen und Krusten auch Serpeln und Mollusken enthalten.

Im Raum Regensburg treten in den höheren Schichten zusätzlich zu den genannten Faziestypen Kalke auf, die an Korallen und Bioklasten reich sind, und die schließlich in reine Korallenkalke übergehen, wie sie im Richtprofil des Keilberges vorliegen und dokumentiert sind. Dabei wird die Fazies der Partikelkalke immer grobkörniger und reicher an biogenen Komponenten und entspricht zunehmend Carbonatsedimenten aus flachmarinen Ablagerungsräumen.

#### 4 Die Kalke des Malm im Raum Regensburg und Kelheim

Als Grundlage der ersten Informationen über die Kalke des Malm (Oberer Jura) im Raum Regensburg dienen die Geologische Karte von Bayern (Blatt 6938 Regensburg und Blatt 7037 Kelheim) und die Erläuterungen (Abb. 35).<sup>55</sup> Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass die angeführte Literatur sich im Wesentlichen mit der geologischen Erfassung der anstehenden Schichtenfolge beschäftigt und eine relativ einfache lithologische Untergliederung in große Einheiten vornimmt, die allerdings die Grundlage für die neueren Arbeiten darstellt und diese überhaupt erst ermöglicht hat. Eine fazielle oder mikrofazielle Ansprache der Malm-Kalke, welche eine Zuordnung der an der porta praetoria verbauten Kalksteine zu genau eingegrenzten Schichten oder gar zu einzelnen Steinbrüchen erlaubt, kann jedoch aufgrund des gewählten theoretischen Ansatzes in keiner der Arbeiten enthalten sein.

##### *Geologische Entwicklung des Malm im Raum Regensburg*

Innerhalb des Gebietes um Regensburg wird der Malm des besonders auffälligen Keilberges von ersten Bearbeitern um 1900 für eine „lückenlose“, gegenüber der Frankenalb aber „verkümmerte“ Entwicklung gehalten, die mit etwa 210 m Mächtigkeit in einer randnahen Position des flachen Epikontinentalmeeres abgelagert wurde.<sup>56</sup> Eine paläontologische Gliederung der an Leitfossilien armen Fauna des Keilberges war nicht möglich, deshalb musste man auf die Verwendung lithologischer Merkmale zurückgreifen. Der Grund für den Methodenwechsel war die Verwendung der von Quenstedt im Jahr 1858 eingeführten Jura-Biostratigraphie, die auf dem schichtabhängigen Vorkommen von Ammoniten beruht.<sup>57</sup>

Ammoniten treten aber vorwiegend in der gebankten Fazies, der sogenannten Normalfazies auf, welche im Milieu niedriger Wasserenergie abgelagert wurde. Die Massenkalk des Malm weisen dagegen nur wenige Ammoniten auf, was eben darin begründet ist, dass es sich um Carbonatsande handelt, die zum Teil unter sehr hoher

<sup>55</sup> Bauberger et al. (1969), Rutte (1962). Weitere Daten werden in Kurzform aus anderen Arbeiten zusammengetragen von Meyer & Schmidt-Kaler (1995). Auch kann weitere Literatur zur Frage der Ausbildung der Kalke des Malm im Raum Regensburg herangezogen wie Meyer (1972, 1975, 1977, 1981) und Meyer & Schmidt-Kaler (1984, 1989, 1990, 1991).

<sup>56</sup> Vgl. v. Ammon (1875) und Pompeckj (1901).

<sup>57</sup> Ammoniten: Ausgestorbene Kopffüßer mit Kalkschale.

Wasserenergie (Wellen, Strömungen) abgelagert wurden.<sup>58</sup> Gleiches gilt für die hellen Kalke des Kelheimer Raumes, die überwiegend Schuttkalke von Korallenriffen darstellen.

Eine hervorragende Beschreibung der für eine Verwendung als Baustein wichtigen Massenkalke liefern Bauberger (1969) und Rutte (1962). Aufgrund der Bedeutung für die Herkunftsanalyse wird der bisherige Kenntnisstand im folgenden Abschnitt zusammenfassend abgehandelt (Tab. 1, Anhang).

### *Massenkalkstein – Plumper Felsenkalk und Korallenkalk*<sup>59</sup>

Der Plumpe Felsenkalk (Anhang 1) ist als schmales Band in den unteren Hangteilen der Flusstäler von Donau, Naab und Regen anzutreffen. Die größte Verbreitung ist am Keilberg zu registrieren, an dessen West- und Südseite die Schichtenabfolge anhand einer Vielzahl kleiner und aufgelassener Steinbrüche in natürlichen und künstlichen Aufschlüssen sowie im großen Funk-Bruch zu studieren ist. Geologisch gesehen beginnt das Vorkommen nördlich von Schwabelweis am Fuß des „Großen Felsens“ mit einer 7 m mächtigen Zone aus Dolomit, die gelbbraun verwittert und zerfällt. Über dieser folgen helle, massige Kalksteine mit einer Schichtstärke von 15 m bis 20 m, die von dolomitischen Kalken abgelöst werden. Die Dolomitzone ist nicht durchgehend entwickelt; sie erscheint örtlich in Form von Dolomitlagen und -linsen.

Westwärts zwischen dem „Großen Felsen“ und dem Kalkwerk wird ein Teil der dolomitischen Partien von massigen oder grob gebankten, hellen und dichten, auch rötlich gefärbten und zuckerkörnigen Kalksteinen mit Hornsteinlagen abgelöst (30 m). Erst darüber steht der eigentliche Plumpe Felsenkalk in einer Mächtigkeit von 40 m bis 50 m an. An der Südwestecke des Keilberges zeigt er seine von Verkarstung geprägten Formen mit zahlreichen Spalten, Trichtern und Wannern, die bis unter die Steinbruchsohle reichen und mit Ablagerungen der Oberkreide gefüllt sind.<sup>60</sup>

Erst im Dünnschliff zeigt sich der Aufbau des Kalkes aus Ooiden, Onkoiden und Lagen aus Feinschutt. Die höchsten Partien des Steinbruchs enthalten neben Brachiopoden, Muscheln, Crinoiden- und Seeigelresten auch Korallenstöcke und Kalkschwämme. In der Gesteinsfazies herrscht ein massiger, dichter, weißer bis gelblicher Kalkstein mit splittrigem bis muscheligen Bruch vor. Vereinzelt sind körnige Massen von dunkler bis rötlicher Farbe sowie Hornsteinknollen eingestreut. Nicht selten ist das Gestein von calcitverheilten Äderchen oder kleinen Hohlräumen durchsetzt.

Der Massenkalk ist von riffbildenden und riffbewohnenden Lebewesen wie Kalkalgen, Schwämmen, Hyrozoen, Brachiopoden, Muscheln, Seeigeln u. a. aufgebaut worden. Die Riffbildungen haben sich im Lauf ihres organischen Wachstums bis 100 m über den umgebenden Meeresboden erhoben, was in der größeren Mächtigkeit der Schwammriff-Fazies gegenüber der sich gleichzeitig bildenden Schichtfazies zum Ausdruck kommt. In den zwischen den Riffen gelegenen Schüsseln wurde Kalkschlamm sedimentiert, dessen Ablagerung auch nach Erlöschen des Riff-

<sup>58</sup> Koch et al. (1994).

<sup>59</sup> Zit. nach Bauberger et al. (1969); siehe Anhang zu diesem Kapitel (Anhang 1).

<sup>60</sup> Bei den Ablagerungen handelt es sich um Schutzfelsschichten des Mittleren Cenoman, Grünsandsteine des Oberen Cenomans und Reinhausener Schichten des Unteren Turons.

wachstums während des Malm-Zeta angehalten und die Riffe als Plattenkalk-Fazies überdeckt hat.

Neue Daten aus dem Frankenjura haben ergeben, dass die im Malm-Epsilon erreichte weiteste Verbreitung der Massenkalkes zunächst im Malm-Zeta weiter bestanden hat. Mit Beginn der Unteren Solnhofener-Schichten ist sie dann örtlich zurückgegangen, um im Laufe des Malm-Zeta völlig aus unserem Raum zu verschwinden. Das zeitliche Nebeneinander und die Verzahnung der drei Faziesbereiche des Massenkalkes, des Kehlheimer Korallenkalkes (Malm-Zeta 1) und der Plattenkalkes (Malm-Zeta 2) sind beschrieben und zeigen die gleitenden Übergänge zwischen Massen- und Korallenkalkstein. Sie legen eine gleichzeitige Entwicklung beider Fazies nahe.<sup>61</sup>

### *Die Malm-Carbonate im vollständigen Profil am Keilberg*

Der Keilberg umfasst die meisten der für die vorliegende Untersuchung interessanten Schichtglieder. Er gilt als das Standardprofil der unmittelbaren Umgebung von Regensburg. Der gesamte Jura ist an dieser Stelle vor dem Kristallinen Grundgebirge flexurartig nach Osten aufgewölbt. Deshalb sind überhaupt sämtliche Schichtglieder sichtbar.<sup>62</sup> Am Südhang des Berges in der Umgebung des „Großen Felsen“ ist der Übergang von den steil nach Westen einfallenden in die flach lagernen Malmkalkes zu beobachten.

Die von Höhlen durchsetzte untere Felswand, deren Oberkante mit 37 Grad nach Westen einfällt, besteht aus etwa 40 m dichten, gelblich-weißen, sehr grob gebankten Kalken des unteren Malm-Delta. Perlschnurartig aufgereichte Hornsteinknollen, verkieselte Schwämme, Brachiopoden und Bruchstücke von Echinodermen kennzeichnen den „Hornsteinkalk“. Darüber folgt eine Verebnung mit etwa 10 m Dickbankkalken, in denen Ooid- und Schwammlagen wechseln. Aus ihr ragt die weiße Zinne des „Großen Felsens“ senkrecht empor. Sie soll aus typischem Schwamm-Algenkrusten-Riffkalken des höheren Malm-Delta bestehen, deren Strukturen meist nur im Dünnschliff nachweisbar sind.

Dagegen lassen sich die Schwämme in einem dünnbankigen Abschnitt an der Spitze des Felsens mit bloßem Auge erkennen. Mit ihnen beginnt der Malm-Epsilon. Die zunächst noch steil einfallende, etwa 20 m mächtige Dünnbankserie ist nach Westen horizontal gelagert und zieht sich als undeutliche Verebnung bis zur mittleren Sohle des großen Steinbruchs hin. Sie enthält Kieselknollen, Bruchstücke von Echinodermen und Lagen von Ooiden. Die Schwämme sind nicht durch Algenkrusten zu einem Riffgerüst verbunden, sondern vereinzelt von Stromatolithen bewachsen und werden immer wieder von Feinschutt aus Onkoiden eingedeckt.

Über der Verebnung steigt die weiße Wand aus Plumpem Felskalk des Malm-Epsilon bis zum Malm-Zeta empor. An ihrem Fuß lässt sich eine dichte Folge von Kieselschwämmen beobachten. Im Dünnschliff erkennt man auf den Schwämmen einen dicken Bewuchs von stromatolithischen Algen. Solche kleinen Riffkerne stecken in ausgedehnten Ooid-Onkoid-Feinschuttkalken. Diese enthalten in den

<sup>61</sup> Da die reiche Lebenswelt des Korallenkalkes ausgesprochenen Faziescharakter hat, aber keine eigentlichen Leitfossilien besitzt, ist der wesentliche Anhaltspunkt für die stratigraphische Stellung des Korallenkalkes seine Verzahnung mit der Plattenkalkfazies der Tiefen Ulmenis-Schichten (Malm-Zeta 1a).

<sup>62</sup> Siehe Meyer & Schmidt-Kaler (1984).

höchsten Abschnitten des Bruchs neben Brachiopoden, Muscheln, Cronoiden- und Seeigelresten auch Korallenstöcke und Kieselschwämme. Damit wird eine zunehmende Verflachung des Meeres belegt. Am Westrand des Keilberges überlagern schließlich Reste von Plattenkalk des Malm-Zeta die bis zu 60 m mächtigen Plumpen Felsenkalke.

Vier Profile des Keilberges sind für die Fragestellung der Ausbildung charakteristischer Faziestypen in der vertikalen Abfolge im Vergleich mit den an der porta praetoria verbauten Malm- Kalken von Bedeutung (Abb. 42). Die Kurzbeschreibungen angetroffener Carbonatgesteine sind mit einer Kurzbeschreibung charakteristischer Dünnschliffe und der Mikrofazies ausgewählter Proben dem Anhang zu entnehmen. Aus den Richtprofilen lassen sich die Mächtigkeiten der Schichtglieder ermitteln (Tab. 2, Anhang). Danach sind die einzelnen Profile einzustufen.<sup>65</sup> Für die Lage der Profile zueinander ergibt sich das in Abb. 42 dargestellte Bild, das auch einen Eindruck der lateralen Faziesverzahnung gibt.

- Profil-1 verläuft von der Straße senkrecht zur Schichtung bis zum Beginn der Hornsteinkalke, die von Höhlen durchsetzt sind. Nachdem auf der Wiese meist dedolomitische und dolomitische Bankkalke des Malm-Gamma angetroffen werden, erreicht man bei etwa 35 m die Hornsteinkalke des unteren Malm-Delta. Sie sind vorwiegend knollig und teilweise plattig ausgebildet und weisen Kieselknollen bis 20 cm Größe auf. Die Bankmächtigkeiten können bis 50 cm betragen. Im oberen Teil, dem die Basis der Felswand mit Kavernen entspricht, treten dickgebante Kalke mit Mächtigkeiten bis zu 2 m auf. In die Abfolge sind vereinzelt braune, sandige Dedolomite und einige Mergellagen eingeschaltet.
- Profil-2 setzt im Hangenden der Malm-Delta Hornsteinkalke an, durchzieht die dolomitische und dedolomitische Zone sowie die Malm-Delta Dickbankkalke und endet südlich des „Großen Felsens“. Es besteht vorwiegend aus rotbraunen Dedolomiten, in die im oberen Teil des etwa 40 m mächtigen Profils zuckerkörnige Dickbank- und Massenkalke mit Schwammbruchstücken eingeschaltet sind. Darüber folgt eine 11 m mächtige Zone, bevor man die lateralen Parallelprofile 3 und 3a („Großer Felsen“) erreicht.
- Profil-3 setzt etwa 50 m nördlich am Fuß des „Großen Felsens“ an. Es besteht zunächst aus etwa 15 m stark absandenden Dedolomiten und Dolomiten. Im Hangenden folgen Massenkalke und feste Mikrite des oberen Malm-Delta, bevor im obersten Teil feinplattige Kalke des Malm-Epsilon folgen. Tubiphyten sind hier makroskopisch zu beobachten.
- Profil durch den „Großen Felsen“ (Profil-3a). Im unteren Teil, am Fuß des „Großen Felsens“ kommen noch schwammführende Dolomite und knollige Dedolomite vor (bis etwa 16 m Höhe). Darauf folgen massige, teilweise rostbraune und helle Kalke des oberen Malm-Delta, die sich im Gelände durch die fehlende oder nur undeutliche Bankung ausweisen. Sie zeigen bereits makroskopisch ein dichtes Packstone-Gefüge mit zahlreichen größeren Komponenten und Tubiphyten.

<sup>65</sup> Bemerkenswert sind dabei die in den verschiedenen Beschreibungen von Meyer & Schmidt-Kaler (1984) und Meyer & Schmidt-Kaler (1995) angegebenen Mächtigkeitsunterschiede, die nur mit ausgeprägten lateralen Fazieswechseln auf relativ geringe Entfernung von 1–2 km zu erklären sind. Daher sind auch die hier angegebenen Mächtigkeiten der untersuchten Profile und des gesamten Untersuchungsintervalls nur für die behandelte Lokation verbindlich.

## Fazielle Entwicklung der Malm-Kalke des Keilberges

Das stratigraphische Intervall der Malm-Kalke des Keilberges umfasst den Zeitraum des oberen Malm-Gamma bis zum Malm-Zeta. Die untersuchten Profile lassen sich zu einem Gesamtprofil aneinander reihen, das in zwei Teilen beschrieben wird (Anhang 2 und 3).

### *a) Die Profile 1 und 2 (der liegende Teil)*

**Profil-1** weist vorwiegend Gesteine des unteren Malm-Delta auf. Der unterste Abschnitt wird als Malm-Gamma ausgegliedert, doch erfolgt diese Einstufung nur aufgrund fazieller Daten sowie der Mächtigkeiten des Malm-Delta. Biostratigraphische Daten sind nicht vorhanden. Daher bleibt die Einstufung fraglich. Der Abschnitt kann auch dem untersten Malm-Delta zugeordnet werden. Dafür könnte zudem das Vorkommen von feinen Filamenten sprechen, die ebenfalls in jüngeren Gesteinen vorkommen. Diese Filamente, die als feiner Schalenbruch interpretiert werden, stellen eine an der Basis des Malm-Delta auftretende Komponente dar, der ein stratigraphischer Leitwert zukommt (Tab. 3, Anhang).

Die Biomikrite, Biomikrudite und Biolithite sind reich an tonhaltiger, mikritischer Matrix. Die meisten Gesteine zeigen wechselnde Gehalte an Dedolomit, die auf kleine, in der Matrix verstreute isolierte Rhomboeder zurückgehen. Im oberen Teil des Profils ist ein stark dedolomitischer Bereich von etwa 5 m Mächtigkeit vorhanden. Hier werden nur kristalline Dedolomite mit einzelnen, noch erkennbaren Rhomboedern gefunden. Darüber folgen ca. 5 m eines Tubiphyten-Onko-Oobiosparits. Dedolomithomboeder treten in primär magnesiumcalcitischen Komponenten wie den Tubiphyten auf.

**Profil-2** läuft durch den Bereich der Dolomit- und Dedolomitzone, die im Gelände durch die untere mächtige Felsbank mit großen Höhlen charakterisiert ist. Hier kommen vorwiegend rotbraune und auch gelbliche, oft stark absandende Dedolomite vor. Die Dünnschliffanalyse zeigt, dass neben reinen kristallinen Dedolomiten mit wenigen Geisterstrukturen von Biogenen (Bivalven ?, Echinodermen ?) vorwiegend Filament-Tubiphyten-Kalke zu finden sind, die einen Dedolomitanteil von meist 70 % aufweisen. Nur im oberen Bereich des Profils treten etwas mächtigere Bänke (bis zu 3 m) auf, die aus Packstones und Grainstones mit hohem Dedolomitanteil bestehen. Im oberen Teil des Profils kommt eine dolomitische Lage vor, die aus Dolomiten in Form von einzelnen oder in Flecken zusammengewachsenen Rhomboedern besteht. Lokal sind authigene Quarzbildungen zu beobachten, die unregelmäßig in der pelletoiden Matrix auftreten und an keine Komponenten gebunden sind.

### *b) Profile 3 und 3a (der hangende Teil)*

**Profile-3 und 3a:** Sie stellen eine laterale Faziesvertretung dar. Nach einer bedeckten Zone von 10 m beginnt Profil-3 mit dolomitischen Schwamm-Biomikruditen und Tubiphyten-Biopelmikriten. Dieser geringmächtige dolomitische Bereich geht ins Hangende in graufleckige und rötliche Dedolomite über, die etwa 7 m Mächtigkeit aufweisen. Dabei handelt es sich um kristalline Dedolomite mit einigen Geisterstrukturen von Biogenen. Das Kristallgefüge ist meist dicht verzahnt. Darüber ist erneut eine dolomitische Lage von ungefähr 5 m eingeschaltet. Es treten vorwiegend isolierte Dolomithomboeder auf, die gelegentlich zu größeren dolomitischen Arealen zusammengewachsen sind. Im Hangenden folgen im Wesentlichen Intrabiopel-

mikrite, die reich an Tubiphyten sind. Stellenweise sind dedolomitische und vereinzelt dolomitische Lagen von geringer Mächtigkeit (bis 2 m) eingeschaltet. Das Profil endet in den feinplattigen und feingebankten Kalken des Malm Epsilon. Hier treten Tubiphyten-Intrabiopelmikrite mit Krusten auf, die dem Gestein lokalen Boundstone-Charakter verleihen.

Insgesamt entspricht der Bereich dem lateralen Profil durch den „Großen Felsen“. Im Gegensatz zu jenem Profil sind hier vorwiegend Wackestones entwickelt, die anzeigen, wie die Packstone-Fazies des „Großen Felsens“ sich lateral faziell verändert. In diesen Wackestones treten stark wechselnde Gehalte an Dolomit auf, der heute vorwiegend als Dedolomit vorliegt (5–70 %). Die ehemaligen Dolomithomboeder befinden sich entweder in der mikritischen Matrix oder in primär magnesiumcalcitischen Komponenten. Verkieselung ist nicht mehr zu beobachten. Einige der Dedolomithomboeder liegen als partielle oder vollständige kleine Kristall-Lösungsporen vor.

Das Profil des „Großen Felsens“ sollte mehr oder weniger riffogene Gesteine von Schwamm-Algen-Riffen zeigen.<sup>64</sup> Die massigen Kalke bestehen jedoch überwiegend aus Packstones und Grainstones mit zahlreichen Tubiphyten. Ebenso sind Onkoide und lagenweise auch gut ausgebildete konzentrische Ooide charakteristisch. Es handelt sich also eigentlich um eine unter höherer Wasserenergie abgelagerte Carbonatsandfazies, die zeitweise von Algenkrusten (mikrobiellen Matten) fixiert wurde. Schwämme bilden kein biogenes Gerüst.

Während an der Basis des Profils noch Dedolomite und vereinzelt geringmächtige Dolomitlagen auftreten, besteht das Profil-3a im Wesentlichen aus Kalken. In ihnen sind meist noch gut erkennbare marin phreatische Zemente ausgebildet, die nachweisen, dass primär Poren zwischen den Komponenten vorhanden waren, in denen sich die idiomorphen Zementkristalle ganz früh, unmittelbar nach der Ablagerung aus dem Meerwasser ausscheiden konnten.

#### *c) Die Schichten im Hangenden der Malm Epsilon Dünnbankserie*

Diese Gesteine werden als Malm-Epsilon bis Malm-Zeta Massenkalkfazies eingestuft.<sup>65</sup> Im Gelände bestehen sie aus rostbraunen Kalken, zahlreichen dichten Mikriten, bräunlichen Mikriten und selten aus komponentenreichen Kalken mit Schwämmen.

Die Dünnschliffanalyse dieser massig wirkenden Kalke oberhalb der Verebnungsfläche zeigt eine starke diagenetische Veränderung durch Dolomitisierung und Dedolomitisierung. Sie bestehen vorwiegend aus Schwamm-Krusten-Biolithiten, die mehr oder weniger dedolomitisch ausgebildet sind (Spuren bis 80 %). Ferner kommen Tubiphyten und lagenweise auch Filamente vor. Reine kristalline Dedolomite sind in zwei Lagen von 0,5 m und 6 m Mächtigkeit eingeschaltet. Diese Gesteine sind je nach dem Gehalt an Dedolomit durch dünne, feinverteilte Hämatitsäume rötlich gefärbt, die meist an die ehemaligen Rhomboeder gebunden sind.

#### *Der Keilberg als naheliegendes Abbaugebiet?*

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Kalke am Keilberg sowohl in der geschichteten Fazies der Mergel-, Bank- und Plattenkalke als auch in der Massen-

<sup>64</sup> nach Meyer & Schmidt-Kaler (1984).

<sup>65</sup> ebd.

fazies der ungeschichteten, zum Teil dolomitischen Schwammkalke entwickelt haben. Einen Anschnitt der geologischen Abfolge von Malm-Alpha bis Malm-Epsilon und tiefer bis in den Oberen Lias bietet sich am Südrand des Berges mit dem Kalksteinbruch im Malm-Epsilon.

Beurteilt man die anstehenden Kalke hinsichtlich einer potenziellen Verwendung als Naturwerkstein für das römische Legionärslager, so scheiden die Kalke und Mergel des Malm-Alpha (Unterer Mergelkalk), des Malm-Beta (Werkkalk) und des Malm-Gamma (Obere Werkkalke) weitestgehend aus. Sie sind von nur geringer Mächtigkeit und weisen keine der an der porta praetoria gefundenen typischen mikrofaziellen Merkmale auf. Ebenso ist mit großer Wahrscheinlichkeit eine Verwendung der Kalke des Malm-Delta auszuschließen, da in keinem der am Objekt untersuchten Blöcke Merkmale der Verkieselung (Hornsteine) oder eine Dolomitisierung nachzuweisen waren. Auch die Schichtfazies des Malm-Epsilon wurde aufgrund ihrer petrographischen Beschaffenheit und geringen Witterungsbeständigkeit nur in Einzelfällen als Naturwerkstein verwendet.

Erst die über den Hornsteinkalken folgenden massigen, fossilarmen Plumpen Felsenkalke, die bis in den Oberen Weißjura (Malm-Epsilon und Malm-Zeta) reichen, könnten als guter, in unmittelbarer Nähe anstehender Baustein benutzt worden sein. Im höchsten Teil wird der Plumpe Felsenkalk von fossilschuttreichen Korallenkalken abgelöst,<sup>66</sup> die den an der porta praetoria angetroffenen Kalken am ehesten entsprechen, und dies sowohl hinsichtlich der Zusammensetzung, den in ihnen enthaltenen biogenen Komponenten als auch der Farbe und Porosität. Bei den als Kelheimer Kalk bezeichneten Faziestypen handelt es sich ohne Zweifel um die besten Naturwerksteine der Umgebung, allerdings sind die Vorkommen in Richtung Kelheim weitaus reicher.

Die Massen- und Korallenkalke werden von charakteristischen Plattenkalke des Malm-Zeta überlagert. Sie sind aufgrund ihrer petrographischen Beschaffenheit und geringen Witterungsstabilität ebenso wenig für eine intensive Verwendung als Werkstein geeignet wie die Schichtfazies des sich anschließenden Malm-Epsilon.

## 5 Abbaugelände in der näheren Umgebung von Regensburg

Für die Fragestellung, wo denn nun die Naturwerksteine für die porta praetoria eigentlich abgebaut worden sind, wurden zunächst die in unmittelbarer Nähe liegenden Möglichkeiten des Gesteinsabbaus einer eingehenden Prüfung unterzogen. Dabei könnte der Abbau sowohl auf der römisch kontrollierten rechten Donauseite als auch an dem gegenüber liegenden germanischen Ufer stattgefunden haben. Außerdem wird von einem Gesteintransport mit Hilfe von Lastkähnen flussabwärts ausgegangen.

<sup>66</sup> Wenngleich die zeitlichen Beziehungen und die Lagerungsverhältnisse benachbarter Fazies noch nicht völlig geklärt sind, so konnte Rutte (1962) gleitende Übergänge zwischen Massen- und Korallenkalkstein feststellen und beweisen, dass die Entwicklung beider Fazies gleichzeitig verlief. Da die reiche Lebewelt des Korallenkalkes ausgesprochenen Faziescharakter hat, aber keine eigentlichen Leitfossilien besitzt, ist der wesentliche Anhaltspunkt für die stratigraphische Einordnung des Korallenkalkes seine Verzahnung mit der Plattenkalkfazies der Tiefen Ulmensis-Schichten (Malm-Zeta 1a). Die Fauna des Plumpen Felsenkalkes ist arm und eintönig.

Eine weitere Annahme ist, dass man in römischer Zeit zunächst versuchte, Naturwerksteine im Bereich der Talsohle zu gewinnen, da unter diesen Bedingungen ein Transport großer Blöcke, ob mit Fuhrwerken oder Lastkähnen, am einfachsten zu bewerkstelligen war. Zudem wird auch in römischer Zeit der qualitativ hochstehende Massenkalk aufgrund seiner Witterungsbeständigkeit steile Hänge gebildet haben oder durch Erosion freigelegt gewesen sein. Aus diesem Grund konzentrierte sich die Untersuchung auf Geländeabschnitte, in denen Kalke im Bereich der Talsohle am Fuß steil ansteigender Hügel anstehen.

Die in Betracht kommenden Gebiete sind der geologischen Karte von Bayern zu entnehmen (Abb. 35), die geologische Beschreibung der Schichten des Malm sind in Tab. 3 beschrieben. Im Folgenden werden die typischen Aufschlüsse hinsichtlich der angetroffenen Kalksteinfazies besprochen.

#### *Das Gebiet um Kleinprüfening*

Am nördlichen Ortsende von Kleinprüfening stehen unmittelbar an der Straße zur Wallfahrtskirche und der Marienhöhe Massenkalk mit einer Mächtigkeit bis zu 20 m an (Taf. 1/1). Eine deutliche Bankung ist nicht zu erkennen. Das Gestein zeigt ein ähnliches Gefüge wie das an der Straße südlich von Großprüfening und besitzt eine Oberfläche, die in Form kleiner Kuben modelliert ist. Ein Profil an der Nordseite des Felsens weist durchweg feine, helle, dichte, mikritische Kalke auf, die ebenso am Hof des letzten Hauses von Kleinprüfening anstehen. Innerhalb des Profils sind helle Kalke zu finden, denen feine Dedolomithomboeder ein unregelmäßiges Aussehen verleihen.

Generell handelt es sich um helle, feinpeloide Tubiphytenkalke mit kleinen schwarzen Manganflecken. Der Felsen aus Massenkalk besteht aus sehr feinem, hellem Peloidkalk, in dem feinste Schalenbruchstücke (sogenannte Filamente) auftreten. Die Kirche neben der Eisenbahnlinie ist auf hellgrauem, fleckigem Kalk gebaut, der zahlreiche Tubiphyten enthält (Tubiphyten-Packstone). Unmittelbar unter der Kirche steht Kalk mit dunklen Flecken und kleinen Dedolomit-Rhomboedern an.

Der Weg hinter der Kirche führt durch eine Eisenbahnunterführung auf der anderen Seite der Gleise über eine Treppe steil bergauf. Hier stehen dunkle, zucker-körnige Dolomite an, die einige rundliche Schwamm-Massenkalk bis 1 m Durchmesser enthalten und zuoberst hell, kristallin, undeutlich gebankt und leicht löchrig erscheinen (Taf. 1/2). In einem mäßig dolomitisierten Kalk, der etwa auf der halben Höhe der Steige auftritt, sind Tubiphyten eingebunden.

#### *Das Gebiet westlich von Mariaort*

Entlang der heutigen Bundestrasse 8 in westlicher Richtung von Mariaort gelangt man zu einem großen Steinbruch, der nördlich der Straße vor Etterzhausen liegt. Hier stehen in den unteren zwei Dritteln ausschließlich Dolomite an, die als Werksteine nicht in Betracht kommen. Dasselbe gilt für die Felsen, die sich auf der Wegstrecke an der Straße befinden. Auch die hohen Felstürme im Naabtal bestehen in den unteren 20 m bis 25 m aus zuckerkörnigem, hellem Dolomit. Die oberen Partien über den Baumwipfeln – nach einer Hohlkehle in etwa 20 m Höhe – bestehen dagegen fast nur noch aus massigem Kalk mit undeutlichen Bankung (Taf. 1/3). Die Übergangszone zum hangenden reinen Kalk ist durch einen schwach dolomitischen, rauen, hellen Peloidkalk gekennzeichnet, der kleinste Dedolomithomboeder als scharf begrenzte, dunkle, eckige Kristallitflecken enthält.

Erst am östlichen Ende dieses bis zur Straße reichenden Felsenzuges tritt unmittelbar an der Straße ein heller, grobkörniger, teils löchriger Kalk auf (Taf. 1/4), der einem grobkörnigen Lithoklast-Peloidkalk mit vielen Tubiphyten und Molluskenschill (Pack-Grainstone) zuzurechnen ist. Die Dolomit-Grenze zieht sich diagonal den Hang herunter, so dass hier nur Kalke anstehen.

#### *Das Gebiet südlich von Kneiting*

An der südlichen Ortseinfahrt von Kneiting befindet sich ein aus mehreren übereinander gestaffelten, rundlichen Großstrukturen zusammengesetzter heller, etwa 30 m hoch aufragender Massenkalk, der an seinem Fuß eine tiefe Höhle mit Marien tafel aufweist (Taf. 2/1). Die Kalke sind zum Teil extrem dicht (mikritisch) und enthalten einige Schwämme und terebratulide Brachiopoden, die teilweise in recht guter Schalenerhaltung vorliegen. Es handelt sich um splittrig brechende Massenkalk, die aufgrund ihrer Sprödigkeit nicht für den Gebrauch als Werksteine geeignet sind.

#### *Das Gebiet um Pfaffenstein*

Pfaffenstein befindet sich nördlich der Donau unmittelbar an der Bundesstraße 8 und weist mehrere größere helle Massenkalk auf, auf denen Villen errichtet und steil ansteigende Gärten angelegt sind (Taf. 2/2). Die hier anstehenden Kalke sind helle, meist splittrig brechende peloidale Tubiphytenkalke mit großen Bioklasten. Sie dürften ebenfalls aufgrund ihres spröden Verhaltens bei der Bearbeitung kaum für Bauzwecke in Frage kommen.

#### *Das Gebiet südlich Großprüfening*

Südlich von Großprüfening stehen an der Donau entlang der Straße nach Matting hohe, massige Felsen an (Taf. 2/3). Sie sind gemäß der Geologischen Karte durchgehend als Plumpe Felsenkalke des Malm-Epsilon bis Malm-Zeta 1 angegeben und weisen Höhen bis zu 20 m auf. Charakteristische Merkmale sind große rundliche Strukturen, die auffallende Feinkörnigkeit des Materials und eckige Absonderungen auf rundlichen Flächen, wie sie für dichte, ungeschichtete Massenkalk typisch sind. Dementsprechend ist auch keine Bankung vorhanden. Gelegentlich sind am Fuß der Felsen bis etwa 5 m oberhalb der Straße dunkelgraue Linsen aus zuckerkönigem Dolomit (Taf. 2/4) in das ansonsten helle Gestein eingelagert.

An dieser Stelle hat man es mit dichten Kalken zu tun, die aus feinen Peloiden und größeren bioklastischen Komponenten bestehen und wenige Filamente und Tubiphyten enthalten. Vereinzelt sind cremebraune Partien anzutreffen, die reich an Tubiphyten sind. Nach der Klassifikation von Dunham liegen peloidhaltige Packstones-Grainstones vor.

#### *Das Gebiet um Unterirading*

Auf dem gesamten Abhang an der Donau südlich der heutigen Autobahnbrücke stehen Massenkalk (Plumpe Felsenkalke) im Wechsel mit grob gebankten Partien an. Bei Fohlenhof (Taf. 3/1) findet man einen klassischen, rundlichen, splittrig brechenden Massenkalk (Taf. 3/2), während bereits bei Unterirading grobe Partikelkalke mit zahlreichen Tubiphyten auftreten. Vor der heutigen Gaststätte Walba sind

wiederum gebankte Kalke zu finden; bei Walba selbst lassen sich nur rundliche Massenkalk und leicht gebankte, dichte mikritische Kalke feststellen.

Das Vorkommen bei Walba und das sich anschließende Steinbruchgebiet ist von besonderem Interesse. Aus diesem Steinbruch soll ein im Stadtmuseum von Regensburg aufgestellter römischer Altar stammen. Die Kalke sind jedoch so feinkörnig und muschelig brechend, dass die Herstellung fein profilierter Reliefs mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden gewesen wäre und eine Verwendung für Bildhauerstücke ausgesprochen unwahrscheinlich ist.

Proben des Kurzprofils im Steinbruch bis hinauf zum vermeintlichen Römerturm<sup>67</sup> haben nur mikritische Kalke, Kalke mit mikritisierten Ooiden und vereinzelt Schwammstrukturen ergeben. In den oberen Abschnitten treten vermehrt gröbere Kalke (Packstones) auf, in denen Tubiphyten und besonders Lithoklasten vorkommen (Taf. 6/3 und 4).

Eine erste Untersuchung des römischen Altars zeigt dagegen, dass es sich bei diesem Material um einen groben, porösen biogenen Schuttkalk mit großen Bruchstücken von Muscheln und Echinodermen handelt, der dem Faziestyp des Kelheimer Schuttkalkes entspricht (Taf. 6/1 und 2). Die vergleichende Analyse der Gesteine aus dem Steinbruch und dem Werkstück schließen eine Herstellung des Altars aus dem Bruchmaterial aus.

#### *Die Felsen an der westlichen Seite der Donau*

Gegenüber Matting stehen eine Vielzahl grob gebankter Felsen an, bei denen es sich aufgrund der Bankung und des südlich von Bad Abbach an der Straße anstehenden Materials sehr wahrscheinlich um grobkörnige bioklastische Sande handelt (Taf. 3/3). Die grobe Bankung zieht sich am westlichen Ufer der Donau weiter in Richtung Kapfelberg, das gegenüber von Bad Abbach liegt.

Am östlichen Ufer gelangt man nach einer langen Donauschlinge über den Gleitgang der Donau nach Oberndorf, das einen großen Steinbruch mit nachfolgenden hohen Felsen besitzt (Taf. 3/4). An dieser Stelle liegen ausschließlich zuckerkörnige Dolomite vor, die keinerlei Verwendung als Werksteine gefunden haben. Auf dem Gipfel des Steinbruchberges befand sich ein römischer Beobachtungsturm. Erst vor Bad Abbach beginnen wiederum helle Kalkfelsen, die mit ungeschichteten Massenkalken durchsetzt sind und sich durch überwiegend feine und dichte Kalke auszeichnen.

#### *Die Kalke zwischen Regensburg und Kelheim*

Die Kalke zwischen Regensburg und Kelheim sind in markanten Felsbildungen auf beiden Seiten der Donau aufgeschlossen und weisen eine Vielzahl von Steinbrüchen auf, die über Jahrhunderte hinweg in Betrieb waren und mit den Ortsnamen Matting, Kapfelberg und Saal eng verbunden und in die Natursteinliteratur eingegangen sind. Sie stellen neben den erwähnten Funden römischer und germanischer Relikte (Kapfelberg; Altar in Matting) eine besondere Informationsquelle für die Herkunftsanalyse der Kalksteine dar. Die Kelheimer Kalke sind eine außerordentlich bedeutsame Fazies und gehören zu den höchsten Schichten des Malm.

<sup>67</sup> bei dem es sich um eine mittelalterliche Turmkuhle handelt; persönliche Mitteilung Dr. M. Boos, Museum der Stadt Regensburg.

Wie Rutte in seinen hervorragenden Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern beschreibt,<sup>68</sup> ist der berühmteste aller Kelheimer Aufschlüsse der südwestlich gelegene Bruch von Kapfelberg.<sup>69</sup> Die faziellen Beschreibungen entsprechen nicht der heute gültigen Carbonatklassifikation, sind jedoch so genau, dass sie problemlos übersetzt und mit den an der porta praetoria analysierten und klassifizierten Kalkstein-Faziestypen verglichen werden können.

Die oberjurassische Schichtfolge auf Blatt Kelheim gliedert sich in (a) die Massenkalkfazies, (b) die Kelheimer Fazies (Kelheimer Kalk), (c) die Plattenkalkfazies und (d) den Dolomit.<sup>70</sup> Ersetzt man den Begriff des undifferenzierten Massenkalkes durch die „Peloid-Ooid-Lithoklast-Packstones-Grainstones“, also durch Partikelkalke (Carbonatsand-Fazies), lassen sich nahtlose laterale Verzahnungen zwischen allen beschriebenen Faziestypen erklären. Damit würde die Sedimentation der Sedimente im Raum Kelheim mit der heutigen Sedimentation ähnlicher Carbonatsedimente in rezenten Bildungsbereichen erklärbar sein. Für die Frage nach der Herkunft der Werksteine der porta praetoria eröffnen sich demnach die Möglichkeiten eines faziellen Vergleichs. Die Beschreibungen nach Rutte und die ergänzenden Kommentare zur vergleichenden Analyse sind im Anhang zu diesem Kapitel enthalten (Anhang 4).

### Die fazielle Entwicklung im Steinbruch Kapfelberg

Von dem als Quelle für römische Hausteine angegebenen Steinbruch Kapfelberg – er befindet sich an der Nordgrenze der Kelheimer Wanne nahe einem sogenannten Rifftrand – wurde in den 1970er Jahren ein Profil aufgenommen, das die Westwand des Bruchs beschreibt. Es wurden überwiegend sogenannte allodapische Kalke nachgewiesen, die in plattigen Kalken eingelagert sind.<sup>71</sup> Definitionsgemäß wurden diese Kalke von einem lokalen Liefergebiet aus, beispielsweise einem Riff, in ein Becken geschüttet. Aus diesem Grund weisen sie somit mit zunehmender Entfernung vom Liefergebiet geringere Korngrößen auf und gelten als „lateral gradiert“. <sup>72</sup> Außerdem enthält der Steinbruch von Kapfelberg ein markantes kleines fleckenhaftes Riff, das als Korallen-Patch-Riff bezeichnet wird.

Das ermittelte Profil (Abb. 43; Erläuterungen im Anhang zu diesem Kapitel, Anhang 5) weist 20 m Mächtigkeit auf und zeigt überwiegend mikritische Kalke des Malm-Zeta 1, in die Schichten mit Riffschutt eingeschaltet sind. Der Malm ist von einer etwa 12 m mächtigen Schicht aus Regensburger Grünsandstein überlagert.<sup>73</sup>

<sup>68</sup> Blatt Nr. 7037 Kelheim (1:25 000).

<sup>69</sup> Rieger (1954) berichtet von der über 1000-jährigen Geschichte des Steinbruches, dessen Blüte in die Zeit der Römer und in das Mittelalter fällt.

<sup>70</sup> Rutte liefert dazu folgende Beschreibungen, in denen die Problematik der Zuordnung einzelner Kalkproben zu den entsprechenden Schichtgliedern oder sogar innerhalb derselben zu speziellen Horizonten, wie es einem Abbau um Steinbruch entsprechen würde, sehr gut zum Ausdruck bringt. Aus den Beschreibungen und den Problemen bei der räumlich/zeitlichen Interpretation der Faziestypen wird deutlich, dass die „Neue Interpretation der Massenkalke“ nach Koch et al (1994) auch in diesem Gebiet viele Fragen beantworten kann.

<sup>71</sup> Nach Flügel (1975): Führer zum „International Symposium on fossil algae“, Erlangen.

<sup>72</sup> Nach Meischner (1964); aufgrund dieses Sedimentationsmechanismus sind die Kalke lagenweise in die normale Sedimentation in den Becken eingeschaltet, bei der es sich überwiegend um feinkörnige Kalke handelt, die sich später plattig absondern.

<sup>73</sup> Die häufigen gradierten Schichten und die schlechte Sortierung des biogenen Schutts und das Fehlen von Infauna belegen das Einschütten des Kalkmaterials. In den groben detritischen

Die gesamte Abfolge kann aufgrund ihrer typischen und charakteristischen Fauna und Flora und der vorkommenden Faziestypen sehr gut in größere Einheiten verschiedener Kalksteinfazies unterteilt werden (Anhang 5), welche man an der porta praetoria wiederfinden sollte, falls denn das Material für das Bauwerk verwendet worden ist.

### Der Steinbruch von Saal

Im Steinbruch Saal sind vorwiegend Kalke des Malm-Epsilon aufgeschlossen, die am Rand der Kelheimer Wanne als Schwamm-Korallen-Riffe ausgebildet sind. Zwischen großen Korallenriffen, die auf Riff-Detritus wachsen, tritt auch eine inviduenreiche Brachiopodenfauna auf. In anderen Bereichen sind Gastropoden zu finden, die von Algen umkrustet sind (Onkoide). Gradierte Oosparite sind selten.

Die Mikrofazies zeigt Pelsparite mit mikritischen Pellets, stromatolithische Pelloide (mit vielen Tubiphyten), umkrustete Schalenbruchstücke, einige Foraminiferen und Bruchstücke von Mollusken. Gelegentlich treten Biokalkarenite (Biopelsparite) auf, die zahlreiche Brachiopoden, und/oder Korallen, Bruchstücke von Echinodermen, Lamellibranchiaten, Bryozoen und viele mikritische Pellets enthalten. Biogene Umkrustungen und Bohrungen sind besonders häufig.

### Die fazielle Entwicklung im Steinbruch der Firma Teich

Der über 100 Jahre alte Steinbruch der Firma Teich bei Oberau nahe Esslingen nördlich der Altmühl ist einer der bedeutendsten Steinbrüche der Region. Nach Rutte fallen in den gewaltigen Steinbrüchen in den untersten Abbaubereich ideale Schwammkalke an. Sie werden als Kalke des Malm-Epsilon bis Malm-Zeta klassifiziert und sind überwiegend Spongiomorphiden-Korallen-Riffe.<sup>74</sup> Im unteren Hangbereich ist die Ooid-Schwamm-Pelletkrusten-Fazies aufgeschlossen. Man erkennt im Gelände kubikmetergroße massige Areale, die aus Pel- bis Oopelbindstones (teilweise Stromatolithen) bestehen und von deutlich gebankten Kalken umgeben sind. Bei letzteren handelt es sich um Oosparite, Oopelsparite und Biopelsparite, die teilweise Intraklasten und Onkoide sowie Kieselschwämme aufweisen. Die fazielle Entwicklung der Schichten ist in Abb. 44 zusammenfassend dargestellt.

An den großen gesägten Steinbruchwänden kann der zentrale Riffbereich mit Schwämmen und Korallen in pelmikritischer Matrix abgelesen werden. Eine quantitative Auswertung ergab 73–85 % Matrix und feiner Detritus, 14–25 % Spongio-

Lagen treten Brachiopoden, Lamellibranchiaten, Gastropoden sowie einige Ammoniten auf, die auch eine Sedimentation im Becken belegen. Viele detritischen Lagen weisen umgelagerte Bruchstücke von *Cayeuxia*, *Marinella* und besonders im oberen Teil des Profils einige Dasycladaceen (*Salpingoporella*) auf. Zwei kleine Patch-Riffe weisen zahlreich *Lithocodium* zusammen mit *Bacinella*, inkustierenden Hydrozoan (*Burgundia cf. trinochii* Munier-Chalmas), Korallen und globularen Hydrozoen (*Baunia multitabulata* (Deninger)) auf. Die Faunenliste weist neben zahlreichen lituoliden Foraminiferen folgende Algen auf: *Cayeuxia anae* Dragastan, *Cayeuxia kurdistanensis* Elliot, *Cayeuxia moldavica* Frollo, *Cayeuxia piae* Frollo, *Marinella lugeoni* Pfender, *Solenopora* sp., *Actinoporella* sp., *Clypeina jurassica* (Favre), *Salpingoporella annulate* Carozzi, *Salpingoporella pygmaea* (Gümbel), *Bacinella* sp., *Consinocodium japonicum* Endo, *Lithocodium aggregatum* Elliot, *Lithocodium morakawai* Endo und *Thaumatoporella parvovesiculifera* (Raineri). Die gebankten Kalke weisen vom Liegenden zum Hangenden zunächst eine Zone mit zahlreichem Vorkommen von *Cayeuxia* sp. auf. Darüber folgt eine mikritische Zone, die wiederum von einer Zone mit zahlreichen Solenoporeen und Salpingoporellen überlagert wird.

<sup>74</sup> Nach Flügel (1975).

morphiden und mikrosolenide Korallen als Hauptriffbildner, andere Korallen sind mit 1 % enthalten, ebenso Crinoiden und Kieselschwämme. Dagegen sind Brachiopoden und Gastropoden eher selten.<sup>75</sup>

Die mikrofazielle Analyse ergibt Biopelmikrite mit thamnasteroiden und microsoleniden Korallen, spongiomorphide Hydrozoen und Kieselschwämme, die alle durch tabulare Wuchsformen charakterisiert sind. Die das Riff bildenden Organismen weisen biogene Bohrungen und manchmal pelmikritische Umkrustungen durch Algen auf. Ausgewaschene Biopelmikrite mit mikritischen Pellets und Onkoiden gemeinsam mit einigen Foraminiferen und Bruchstücken von Echinodermen weisen auf eine niedrige Wasserenergie hin. An weiteren Faziestypen treten meist Schuttkalke in dem östlich anschließenden Tal auf. Der tiefste Bruch zeigt hauptsächlich Pelsparite bis Biopelsparite (Grainstones). Im oberen Teil kommen bereits Pack-, Rudstones mit Rasenkorallen vor.

In dem benachbarten Bruch (Poll-Bruch) sind verschiedene Schüttungen aus größeren und feinerem Material zu erkennen. Liefergebiet für diese Biopelsparite (Pack- und Rudstones) mit Korallen ist ebenfalls die Rasenkorallen-Fazies. Die Pack- und Rudstones des Hohen Bruchs führen hauptsächlich Korallen, Schalenbruch und Echinodermenreste und entsprechen den Schuttkalken im westlichen Profil.

An der Basis ist eine Ooid-Schwamm-Pelletkrusten-Fazies ausgebildet, die von einer Übergangsfazies überlagert wird, in der besonders viele Tubiphyten, Sphären (Calcisphären) und das „Röhrenproblematikum“ auftreten. Massive Korallen werden in der hangenden Schichtfolge der Rasenkorallen-Fazies gefunden, die auch besonders viele Calcisphären aufweist. Erst im obersten Teil steht die Korallenschuttkalk-Fazies an, die durch dendroide und Einzelkorallen sowie durch massive Korallen und Bryozoen charakterisiert ist (Anhang 6).

Es fällt auf, dass die vertikale Faziesverteilung eindeutige Anhaltspunkte für eine Korrelation mit den an der porta praetoria verbauten Kalksteinen und einer möglichen Einordnung in das Steinbruchsystem liefert.

## 6 Kartierung und Einordnung der Kalksteinfazies an der porta praetoria

### *Einführung und Fragestellungen*

Die Bausteine der porta praetoria bestehen aus Massenkalksteinen des Malm, die auf den ersten Blick recht einheitlich erscheinen. Spätere Ergänzungen wurden ebenfalls in Malm- Kalkstein, vereinzelt aber auch in Grünsandstein ausgeführt. Die Oberfläche der Kalksteinquader ist in der Regel mit dichten schwarzen Krusten überzogen.

Bei genauerem Hinsehen zeigen sich bereits makroskopisch Unterschiede aufgrund der Verwendung verschiedener Kalksteinfazies. Ein wichtiges Unterscheidungskriterium ist der Gehalt an feinkörniger Matrix (dichte Kalke) und an verschiedenen Fossilien. Es ergibt sich ein insgesamt erstaunlich breites Spektrum an fein- wie grobkörnigen, porösen und fossilreichen Kalken. Aufgrund der geschilderten geologischen Situation in der Gegend von Regensburg macht dies bereits die

<sup>75</sup> Nach Bausch & Zeiss (1966).

Herkunft der Quader aus mehreren Brüchen oder aus einem lange in Betrieb befindlichen Bruch wahrscheinlich. Die Verwendung verschiedener Faziestypen kann auch als Indiz auf zeitlich unterschiedliche Bauphasen interpretiert werden.

Die Block für Block durchgeführte Fazieskartierung an der porta praetoria sollte folgende Fragestellungen beantworten:

- Anzahl der Faziestypen sowie Häufigkeit und Verteilung am Bauwerk.
- Herkunftsangabe der Kalksteine aus dem Vergleich mit Literaturdaten und von Geländeaufschlüssen.
- Positive oder negative Korrelationen des Faziestyps mit dem Verwitterungsverhalten und der Krustengeneese.

Der Bericht unterteilt sich in die makroskopische Kartierung der verbauten Faziestypen, die Mikrofaziesanalyse und die Diskussion möglicher Zusammenhänge zwischen der Verteilung der Faziestypen und der Baugeschichte.

### *Vorgehensweise und Kartiermethode*

Für die Beantwortung der Fragestellungen erwies sich die Aufstellung einer faziellen Gliederung als sinnvoll, da sich die erforderlichen Merkmale jeden Blockes mit bloßem Auge oder bei Benutzung einer einfachen Lupe erkennen lassen. Auf diese Weise können Gesteinseigenschaften bestimmten Faziestypen zugeordnet werden, die gemäß der gültigen Carbonatklassifikation differenziert worden sind.<sup>76</sup>

Für fazielle Untersuchungen sind umfassende Daten aus geologischen Aufschlüssen (Steinbruch) von besonderer Bedeutung, da sie ein Bild des räumlichen Zusammenhanges der Faziestypen liefern. Derartige Daten stehen bei der Herkunftsanalyse nur bedingt zur Verfügung, da am Bauwerk nur isolierte Blöcke vorliegen, die einen Ausschnitt aus der jeweiligen Bank oder der geologischen Abfolge in einem Steinbruch repräsentieren. Zur Erhöhung der Informationsdichte sind daher mikroskopische Untersuchungen von Gesteinsdünnschliffen notwendig, die aufgrund sedimentologischer Gesetzmäßigkeiten im Ablagerungsraum der Carbonatgesteine eine Vorstellung von den im Steinbruch anstehenden Faziestypen vermitteln.

Im Zuge der Kartierung war eine großflächige Probennahme mit Rücksicht auf die originale Bausubstanz nicht möglich. Daher wurden die Ergebnisse der früheren Untersuchungen von Geländeaufschlüssen einbezogen. Für eine Einteilung in Kartiereinheiten wurden zunächst freiliegende und gering verschmutzte Kalksteinoberflächen betrachtet, die sich bevorzugt an der Westseite und an exponierten Stellen am Bauwerk finden lassen. Im Übergangsbereich zu verkrusteten Partien innerhalb einzelner Blöcke, die in der Regel einem Typus zuzurechnen sind, lässt sich die Abhängigkeit der Krustenbildung vom Faziestyp ableiten. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn unmittelbar unterhalb der Kruste Kalkstein ansteht und keine Schlämme oder Mörtelreste eine eindeutige Ansprache verhindern.

### *Gesteinsbeschreibung und Einteilung in Kartiereinheiten*

Die an der porta praetoria auftretenden Kalksteine lassen sich fünf verschiedenen Faziestypen zuordnen. Zwischen den Kartiereinheiten bestehen Übergänge; im Einzelfall sind sogar zwei angrenzende Faziestypen in einem Block vereinigt, die bei

<sup>76</sup> Die Klassifikation der Kalksteine erfolgte gemäß Dunham (1962) und Folk (1959, 1962).

nicht eindeutiger Zuordnung die Angabe von Zwischenstufen erforderlich gemacht hat (A-B, B-C, etc.).

Die Haupttypen lassen sich nach sedimentologischen Kriterien in Faziestypen zusammenfassen. Typische, die Zuordnung absichernde Merkmale sind angegeben (Klüftung, Porosität, Oberflächenrauigkeit, Verwitterungsbilder, etc.). An makroskopischen Komponenten sind enthalten: a) Fossilreste, sogenannte Bioklasten, wie Schalenbruchstücke von Brachiopoden und Gastropoden, Echinodermenreste, Algenreste, vereinzelt Korallen- und Hydrozoenbruchstücke; und b) mikritische Lithoklasten:

- Faziestyp A:* Dichter feinkörniger Kalkstein (Mudstone-Wackestone), mit vereinzelt Komponenten, deren Größe unterhalb von 5 mm liegt. Das Gestein enthält keine offenen Poren und ist oft geklüftet.
- Faziestyp B:* Dichter, fein- bis mittelkörniger bioklastischer Kalkstein (Wackestone-Packstone). Die Größe der Komponenten liegt unterhalb von 5 mm. Das Material ist dicht bis feinporös und enthält vereinzelt mehrere millimetergroße Lösungsporen. Das typische Verwitterungsbild ist durch Schalenbildung in Millimeterstärke gekennzeichnet.
- Faziestyp C:* Mittelkörniger, gut bis mäßig sortierter bioklastischer Kalkstein (Packstone-Grainstone bzw. Floatstone-Rudstone) mit Komponenten von 5 mm bis 10 mm Größe und auffallend vielen Echinodermenbruchstücken. Das typische Verwitterungsbild des feinporösen Materials ist das Absanden von Komponenten unter Zurücklassen einer rauen Oberfläche. Eine Klüftung ist selten.
- Faziestyp D:* Mittel-grobkörniger, schlecht sortierter bioklastischer Kalkstein (Packstone-Grainstone bzw. Floatstone-Rudstone) mit Komponenten einer Größe von 10 mm bis 20 mm. Er zeichnet sich durch Lösungshohlräume in Größe der Komponenten und größer aus, ist deutlich sichtbar grobporös und besitzt eine ausgeprägt raue Oberfläche. Eine Klüftung ist selten.
- Faziestyp E:* Feinkörniger Kalkstein mit großen Komponenten (Intra- und Bioklasten, Floatstone) und einer feinkörnigen (mikritischen ?) Matrix. Die Größe der Komponenten schwankt zwischen 20 mm bis 40 mm. Die Schalendicke beträgt wenige cm, die Oberfläche ist unterschiedlich rau und porös. Eine Klüftung ist selten.

#### *Ergebnisse der makroskopischen Fazieskartierung<sup>77</sup>*

Folgende allgemeine Tendenzen lassen sich feststellen

- Es treten mehr oder weniger kurze Reihen sowie Bereichen mit gleichen Faziestypen auf, die ein Hinweis auf die Bauabfolge bzw. jeweilige „Lieferungen“ aus nur einem zur damaligen Zeit im Betrieb befindlichen Steinbruch sein können.
- Im östlichen Bereich sind eher feinkörnigere Typen vertreten (A-C), die generell mit zunehmender Bauwerkshöhe und zur Westseite hin gröber werden (C-D).

<sup>77</sup> Die kartographische Erfassung ist im Anhang von Teil C enthalten: Anhang Bestandsaufnahme: Faziestypen.

- Für die ornamentierten Bauteile wurden ohne Zweifel feinkörnige Faziestypen verwendet, was auf eine bewusste Materialwahl rückschließen lässt.
- Für die Fensterrahmen wurden porösere Typen verwendet. Ein möglicher Grund kann in der homogenen Spaltbarkeit der gröberen Kalke liegen. Doch ist nicht auszuschließen, dass gerade ein entsprechender Steinbruch mit genau diesen Faziestypen zur Verfügung stand.

Generell zeigt sich, dass vorwiegend Steine des Faziestyps B und des Übergangstyps B–C verbaut worden sind (Abb. 45). Gliedert man das Vorkommen der verschiedenen Faziestypen innerhalb des Ostturmes der porta praetoria lagenweise auf, erhält man eine auffällige Verteilung, die unterschiedliche Maxima der Faziestypen in einzelnen „Lagen“ (Steinreihen) erkennen lässt (Tab. 4 im Anhang; Abb. 46). Weiterhin lässt sich innerhalb des Bauwerkes – trotz des gehäuften Einsatzes der Faziestypen B und BC – eine Entwicklung von feinkörnigen Malmkalken in den unteren Steinlagen hin zu grobkörnigen Typen in den oberen Steinlagen beobachten, was auf eine Korrelation zwischen dem Abbau im Steinbruch und einer Verwendung am Bauwerk hinweist.

Unabhängig von der makroskopischen Fazieskartierung wurden mikroskopische Dünnschliffuntersuchungen an statistisch ausgewählten Proben durchgeführt. Die ergänzende Mikrofaziesanalyse ist von großer Bedeutung für den Nachweis der generellen Anwendbarkeit der Kombinationsmethode. Nur auf der Basis der Datenkorrelation können die Ergebnisse in eine räumliche und zeitliche Faziesverteilung umgesetzt werden, die sich in der morphologisch modellierten Malm-Landschaft der Umgebung von Regensburg wiederfinden lässt.

### *Ergebnisse der Mikrofaziesanalyse*

Die mikrofazielle Untersuchung erlaubt es, die in zufälliger Verteilung von den Blöcken entnommenen Proben definierten Faziestypen nach Dunham zuzuordnen. Bei der Analyse wurden die Matrix, Komponenten, Zemente und die verschiedenen Porentypen berücksichtigt. Die Verteilung der Mikrofaziestypen ist mit fotografischen Referenzen im Anhang zu diesem Kapitel enthalten (Anhang 7).

Die charakteristischen Typen können wie folgt beschrieben werden:

- *Mudstones-Wackestones*. Sie weisen eine leicht pelletoiden mikritische Matrix auf, in der biogene Reste „schwimmen“. Dabei handelt es sich sowohl um calcitisierte Schwammnadeln (Taf. 4/2) als auch um Calcisphaeren oder feine Molluskenbruchstücke. Zu diesem Typus werden auch die sogenannten „mikritischen“ Biolithite (Taf. 4/1) gezählt.<sup>78</sup>
- *Wacke-Packstone* mit viel peloidaler Matrix und Fossilenschutt (Taf. 4/3). Sie besitzen recht große Bruchstücke umkristallisierter Mollusken und anderer biogener Komponenten (Echinodermerreste). Das Vorhandensein von freien Porenräumen

<sup>78</sup> es handelt sich um klassische spongiolithische mikrobielle Matten. Darin treten auch Pelloide auf, wie sie für die massigen spongiolithischen Kalke des Malm charakteristisch sind. Dieser Typus wird nur aufgrund des mikritischen Gefüges und seine praktischen Bedeutung für die Verwendung als Baustein zu diesem Typ gezählt; sedimentologisch/faziell würde er gemäß den gängigen Klassifikationen in eine andere Gruppe fallen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, anstelle der klassischen karbonatpetrographischen Klassifikationen neue kombinierte, anwenderbezogene Klassifikationen zu erstellen.

wird durch helle, granulare bis blockige Calcizemente angezeigt, die darin gesprossen sind. Molluskenschalen sind meist stark gelöst und/oder rekristallisiert. Lösungshohlräume sind mit granularen Zementen partiell gefüllt. Das Gefüge ist durch eine peloide-mikritische Matrix charakterisiert, die eine hohe Mikroporosität und echte Interpartikelporosität zwischen feinen Peloiden aufzuweisen hat. Antragungen oder Krusten können aufgrund des mikritischen peloiden Matrix-Mikrogefüges nicht tief eindringen und verstärken Oberflächeneffekte.

- *Pack-Wackestone*: Sie sind in der Regel recht porös mit zahlreichen granularen, blockigen Zementen (Taf. 4/4). In das offene Gefüge können auch rezente Lösungen von der Oberfläche her gut eindringen. Matrixrelikte, die lokal zwischen den Komponenten vorhanden sind, können stark umkristallisiert sein und werden dann mikrosparitisch bis feingranular. Die Komponenten bestehen aus Molluskenbruchstücken und Echinodermenbruch sowie auch aus oft nicht näher bestimmbar mikritisierten Komponenten.
- *Packstone-Grainstone* mit Echinodermenreste und syntaxialen Zementen, die zum Teil recht groß ausgebildet sind und Gefügestützfunktion ausüben (Taf. 5/1). Neben Echinodermen und Bryozoenbruchstücken sind Foraminiferen und Molluskenbruchstücke besonders häufig. An abiogenen Komponenten sind Peloide und Lithoklasten zu finden. Häufige Zemente mit Reliktstrukturen deuten auf ein primäres, offenes Gefüge mit viel Interpartikelporen. Lokale Matrixrelikte zeigen den Packstone-Charakter an. Das Packstone/Grainstone-Gefüge mit den über Interkristallporen immer noch zugänglichen Mikroporen, und teilweise auch Makroporen, bedingt eindeutig definierte Eindringpfade von Fluiden in das Gestein, was zu charakteristischen Verwitterungsbildern führt. Krusten und Antragungen sitzen entsprechend zapfenartig verzahnt auf der korrodierten Gesteinsoberfläche, die eine durch die Komponenten bedingte Mikromorphologie besitzt.
- *Grainstones mit Lithoklasten* zeichnen sich durch Coated Grains aus, die durch eine von außen eindringende destruktive Mikritisierung entstanden sind (Taf. 5/2). Primäre Interpartikelporen sind durch Zemente gefüllt, in denen noch Relikte allseitiger Säume zu sehen sind. Vielfach sind sie durch subrezente diagenetische Einflüsse zu einem granularen Zementgefüge umkristallisiert, in dem noch viel offener Porenraum vorhanden ist. Ebenso treten syntaxiale Anwachsäume um Echinodermen auf (Taf. 5/3). Die Komponenten bestehen aus Mollusken, Echinodermen, Lithoklasten sowie mikritisierten Schalenresten. Auffallend ist ferner der gewisse Rundungsgrad, den die Komponenten aufweisen, was auf einen lange wirksamen hochenergetischen Ablagerungsraum schließen lässt. Die relativ großen Zementkristalle bewirken eine recht gute Lösungsstabilität. Dies führt dazu, dass die Bausteine dieses Faziestyps meist gut erhalten sind.
- *Biolithite mit radiaxial-fibrösen Zementen*. Dieser grobkörnige Typus tritt nur vereinzelt auf und stellt Gesteine mit sehr viel offenem Porenraum dar, in dem die radiaxialen fibrösen Zemente allseitig wachsen konnten (Taf. 5/4). Peloide Relikte weisen auf eine Wachstumsverbindung von Algen und anderen Organismen hin, die ein Gerüst gebaut haben. Diese Gesteine dürften ebenfalls dem obersten Malm zuzurechnen sein.

In der Auflistung der untersuchten Proben wurde die Entwicklung innerhalb der Mauer von mehr mikritischen und pelparitischen Faziestypen über molluskenreiche

Faziestypen hin zu reinen Grainstones mit Coated Grains in den höchsten Bereichen der Mauer deutlich (Anhang 8). Es ergibt sich ein vertikales Bild, das der vertikalen geologischen Abfolge in den umliegenden Gesteinsaufschlüssen weitgehend entspricht.

Auf den ersten Blick könnte man folgern, dass die vertikale fazielle Abfolge der Mauerquader den Abbau eines Steinbruches in der klassischen Abbaumethode hangaufwärts durch die geologische Abfolge widerspiegelt. Dies ist jedoch etwas zu einfach gesehen und wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

### *Fazieskartierung am Bauwerk – Diskussion der Ergebnisse*

Vergleicht man die makroskopische mit der mikroskopischen Faziesanalyse von statistisch genommenen Proben zeigt sich, dass beide Ergebnisse gut übereinstimmen. Bereits die makroskopische Faziesanalyse durch einen erfahrenen Carbonatpetrographen kann eine sehr gute Grundlage zur Unterscheidung von Faziestypen an einem Bauwerk liefern.

In der Summe stimmen 35 % der Ansprachen exakt überein, während weitere 35 % innerhalb von Übergangsgruppen gut zu korrelieren sind.<sup>79</sup> Somit stimmen  $\frac{2}{3}$  aller makroskopischen und mikroskopischen Klassifizierungen trotz der Schwierigkeiten durch Überkrustungen und Verunreinigungen überein. Dieser hohe Wert unterstreicht den Sinn der makroskopischen Methode für erste bautechnische Aussagen zur Partikelgröße und Porosität, zu den Matrixanteilen und dem Verwitterungsverhalten.

Für die porta praetoria bedeutet dies, dass die generelle Entwicklung von mehr matrixreichen, mikritischen Gesteinen im unteren Teil der Anlage zu mehr sparitischen, groben Gesteinen im oberen Teil gut zu belegen und den Schadensbildern zuzuordnen ist. Dabei ist der Matrixanteil entscheidend. Hohe Matrixanteile verhindern das rasche Eindringen von Feuchte ebenso wie das Eindringen von oberflächlich aufgetragenen Konservierungsmitteln.

Andererseits weist eine feinpeloidale Matrix eine hohe innere Oberfläche auf, was sie gegenüber mehr sparitisch zementierten Partien leichter löslich werden lässt. Gleichzeitig kann Feuchte, die langsam eingedrungen ist, durch Trocknungsprozesse nur langsam wieder heraus diffundieren. Daraus resultieren die in diesen Gesteinen speziellen Porentypen (Gesteinslösungsporen), die nach den lösungserweiterten Partikellösungsporen später gebildet wurden. Wie das System wirkt, wird am Beispiel der großen Einkristalle der Echinodermenbruchstücken mit syntaxialen Anwachssäumen deutlich: Sie sind stets besonders stabil, da sie nur eine sehr geringe Oberfläche aufweisen, was die Löslichkeit stark herabsetzt. Die Verteilung von fein- und grobgranularen Zementen in partiell offenen Porenräumen ehemaliger Interpartikelporen steuert den Wasserhaushalt. An dieser Stelle können auch Konservierungsmittel tiefer eindringen.

Die Faziestypen lassen bereits auf der Basis der vorliegenden Daten einen Zusammenhang zu den Verwitterungsphänomenen erkennen. Eine Überlagerung der Fazieskartierung mit der Schadenskartierung wird hierzu genauere Informationen liefern. Generell kann festgestellt werden, dass sich für die Durchführung flächen-

<sup>79</sup> Makroskopisch entspricht Faziestyp B beispielsweise den mikroskopisch definierten Zwischenformen der Faziestypen A–B bzw. B–C, oder Faziestyp C den Zwischenformen B–C oder C–D.

hafter Konservierungen wertvolle Hinweise ergeben. Aufgrund der in Lagen anzu-treffenden Verteilung bestimmter Faziestypen, ist eine abschnittsweise Konservierung möglich, sodass eine explizite Behandlung Stein für Stein nicht notwendig erscheint.

## 7 Schlussfolgerungen

Die an der porta praetoria verwendeten Kalksteine stammen stratigraphisch alle aus dem Malm, der rund um Regensburg und insbesondere donauaufwärts an einer Vielzahl von Hängen, oft über deren gesamte Höhe, erschlossen ist.

Aus der Geologischen Karte ergibt sich keine Untergliederung der Malm-Kalke in unterschiedliche Faziestypen, wie es für eine genaue Zuordnung der verbauten Kalksteine und ihrer Herkunftsgebiete erforderlich wäre. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei geologischen Kartierungen laterale und vertikale Faziesübergänge, die das realistische Verteilungsbild von kleinräumigen marinen Lebensräumen zur Zeit des Malm widerspiegeln, nicht berücksichtigt werden. Vordringlich werden markante vertikale lithofazielle Wechsel verzeichnet, welche die stratigraphische Zuordnung unterstützen.

Wie aus dem Richtprofil am Keilberg und aus den im Tal anstehenden analysierten Kalken von Kleinprüfening bis Großprüfening hervorgeht, beginnen die im Niveau der Talsohle anstehenden Kalke meist mit mehr schwammreichen (spongiolithischen) Massenkalken, die sich lateral in mikritische, pellet- und schwammnadelreiche Kalksteine entwickeln. Sie entsprechen einer Bildungszeit im Malm-Delta bis Malm-Epsilon. Die spongiolithischen Kalke sind reich an mikrobiellen Krusten und gehen lateral in die gebankte sogenannte Normalfazies über. In diesen Kalken sind Tubiphyten besonders häufig, die als weiße „Flämmchen“ für den im Bauwesen weit verbreiteten Treuchtlinger Marmor bekannt sind. Diese Malm- Kalke können zu unterschiedlichen Graden dolomitisiert und dedolomitisiert sein.

Lateral und höher folgen pelletreiche Kalke und Partikelkalke mit Ooiden. In den hangenden Schichten schließen sich Kalke mit zahlreichen biogenen Bruchstücken von Mollusken und Echinodermen an, in denen in den höchsten Kalken mikritisierte und umkrustete Partikel, sogenannte Coated Grains, sehr häufig anzutreffen sind.

Diese Abfolge, die eine allgemeine Verflachungstendenz und Zunahme der Wasserenergie im Bildungsraum des Malm-Meeres widerspiegelt, beschreibt die Entwicklung von matrixreichen über matrixarme zu matrixfreien Kalksteinen, die nach der gültigen Carbonatklassifikation als Wackestones, Packstones und Grainstones beschrieben werden und auf einem Meeresboden mit Relief abgelagert wurden. Auf dem vorgegebenen Relief haben sich, gemäß klassischer Interpretation, Korallen und Korallen-Schwamm-Riffe entwickelt, zwischen denen sich Becken von unterschiedlicher Größe ausgebildet haben. Darin wiederum hat sich der Schutt der Riffe in Form abgebrochener Organismenreste angesammelt, mit den dort vorhandenen Sedimenten vermischt und schließlich fein- bis grobkörnige Partikelkalke gebildet. Diese sogenannten Riffschuttkalke stellen die hochwertigsten Bausteine der allgemein „Kelheimer Kalkstein“ genannten Faziestypen dar.

Die geschilderte Abfolge ist vertikal besonders stark ausgeprägt. Gleichzeitig sind aber auch innerhalb eines Schichtenpaketes laterale Übergänge zu verzeichnen, in denen sich die Verzahnungen der verschiedenen Fazies zur Zeit des Oberjura widerspiegeln. So kommt es, dass beispielsweise südlich von Großprüfening entlang der

Donau dichte, spröde Kalke mit zahlreichen Schwämmen und Algenkrusten in körnige Kalke (Partikelkalke) übergehen, die aus biogenen Bruchstücken bestehen.

Möchte man eine Aussage über die Herkunft der an der porta praetoria verbauten Malmkalke machen, ist der Zusammenhang zwischen der vertikalen Abfolge am Bauwerk und den geologischen Gegebenheiten zu klären. Die vertikale Abfolge der Faziestypen am Bauwerk liefert die Grundlage für einen Vergleich mit den Geländeaufschlüssen und erlaubt erste Aussagen zur Herkunft der Gesteine (Herkunftsanalyse). Anhand der Proben vom Objekt wird die Entwicklung innerhalb der porta praetoria von mikritischen und pelparitischen über molluskenreiche Faziestypen hin zu reinen Grainstones mit Coated Grains in den höchsten Bauabschnitten deutlich. Demnach ergibt sich eine ausgeprägte vertikale Verteilung, welche der vertikalen geologischen Abfolge in den umliegenden Bergen weitgehend entspricht. Aus diesem Grund könnte man schließen, dass die fazielle Abfolge in den Werksteinen der Mauer mit den Usancen beim Abbau der Gesteine im Bruch zu korrelieren ist, der gemäß der klassischen Methode an der Talsohle beginnt und sich in Stufen durch die geologische Abfolge nach oben arbeitet.

Dolomit bzw. Dedolomit sind Gesteine, die aufgrund ihrer stark wechselnden, Härte und Wasseraufnahme sowie Inhomogenität kaum als Werksteine genutzt wurden. Alleine diese Tatsache schließt bei der Suche nach römischen Steinbrüchen die Gebiete in der Umgebung von Regensburg aus, in denen dolomitisierte oder dedolomitierte Malmkalke anstehen. Und das sind nicht wenige. Dagegen sind an der Basis der porta praetoria pelleteide Schwammkalke anzutreffen, wie sie gerade im unteren Teil der Abfolge an der Donau als Fels anstehen. Derartige Gesteine sind in unmittelbarer Nähe zur Baustelle des Legionärlagers häufig vorhanden. Dass sie nur zu einem geringen Teil verwendet wurden, wird nicht zuletzt an dem splittrigen Bruch bei der Bearbeitung gelegen haben, den man bei der Herstellung von Fundamentsteinen noch tolerieren konnte; für Profil- oder Relieifarbeiten kam dieses Material aber nicht in Frage.

Aus den Brüchen, die an der Talsohle begonnen wurden, konnte man überwiegend klassische Malmkalke mit Schwämmen und mikrobiellen Krusten beziehen. Das war allerdings nur in einem Bereich möglich, in dem die Korallenriff-Fazies und die laterale Schuttfazies nicht weit in das Tal hinunter reicht. Der im Bauwerk feststellbare langsame Übergang zu gröberen Gesteinen, in denen verstärkt mikritisierte Komponenten und Echinodermenbruchstücke auftreten, lässt vermuten, dass mehrere Steinbrüche den Hang hinauf nach oben erweitert wurden. Dieser Befund deckt sich mit den heute üblichen Abbautechniken in verschiedenen Etagen, bei denen mit dem systematischen Abbau in Stufen immer wieder Blöcke aus den unteren Etagen gebrochen werden müssen. Diese von praktischen Begebenheiten geprägte Abbautechnik erklärt den allmählichen Wechsel der am Bauwerk festgestellten Faziestypen. Die fazielle Höhenentwicklung vom unteren Teil des Steinbruch in das stratigraphisch höhere Niveau korreliert mit dem sukzessiven Übergang von feinen matrixreichen hin zu groben, sparitischen Gesteinen.

Der deutliche Wechsel in den Faziestypen der obersten Lage an den Rundbogenfenstern des Ostturmes ist allerdings nur schwer in dieses Schema zu integrieren. Das völlige Fehlen feinkörniger Typen kann ein Hinweis auf eine längere Unterbrechung der Bautätigkeit oder den radikalen Wechsel des Steinbruchs sein.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kalke der unmittelbaren Umgebung vom Keilberg über die Hänge von Kleinprüfening und Kneiting bis nach Pfaffenstein und Großprüfening nur zu Beginn der Bauzeit und in sehr geringem Umfang

für die Errichtung des Mauerwerks der prota praetoria verwendet worden sein konnten. Diese Annahme wird nicht zuletzt durch die Analyse des im Steinbruch von Walba gefundenen, unfertigen römischen Altars gestützt. Denn der Kalkstein des Altars ist ein Partikelschuttkalk, der nur in den höheren Partien des Malm vorkommt und mit zunehmender Häufigkeit erst donauaufwärts Richtung Kelheim ansteht. Das Material des Bruches besteht dagegen aus pelletoiden Kalken oder Kalken mit Schwämmen und Tubiphyten, weshalb der Altar nicht dem Steinbruch entstammen kann und die Zuweisung des Bruchs als römisch, lediglich aufgrund des Fundes, zu revidieren ist.

Auch der in der Literatur häufig genannte Kapfelberger Bruch kann nur zu einem geringem Umfang als Lieferant für die Quader der porta praetoria gedient haben. Das kann von den typischen Merkmalen der bei Kapfelberg anstehenden gebankten feinen und groben Riffschuttkalke abgeleitet werden, die reich an verästelten Filzalgen sind (Codiaceen). Vergleichbare Organismen sind jedoch in den untersuchten Kalksteinen Mangelware.

Bilanziert man die Kalksteinfazies am Bauwerk und setzt sie in Beziehung zu der Faziesverteilung in der Umgebung von Regensburg, so ist der überwiegende Teil der Kalksteine an der porta praetoria nicht der näheren Umgebung sondern dem Gebiet um Saal und Kelheim zuzurechnen. Der Befund wird durch die Tatsache unterstützt, dass die Dritte Italienische Legion bereits um 70 n. Chr. bei Saal stationiert war, lange bevor das Regensburger Standlager errichtet wurde. Hier hatten die römischen Besatzer ausreichend Gelegenheit, Erfahrungen mit dem Rohstoffvorkommen zu sammeln, denn der bei Kelheim und Saal anstehende Stein zeichnet sich durch eine sehr gute Bearbeitbarkeit und das Fehlen einer bevorzugten Spaltbarkeit aus. Zudem ist er weder spröde noch neigt er zum Absplittern, was die anderen Schwammkalke an der Talsohle der Donau kennzeichnet. Somit spricht einiges dafür, dass die römische Besatzung von Eining-Unterfeld die Keimzelle für die intensive Ausbeutung des Kelheimer Schuttkalkes war – eine Tradition, die bis dato auf hohem Niveau beibehalten wurde und ein eindrucksvolles Beispiel für die unnachahmliche Fähigkeit der Römer beim Auffinden und der Ausbeutung geeigneter Rohstoffe liefert.

Prinzipiell zeichnet sich das Gesetz des Abbaus in der vertikalen Abfolge der Faziestypen an der porta praetoria ab. Die trotz der generellen Tendenz feststellbare Durchmischung kann mit der Organisation der Großbaustelle Castra Regina und den Gepflogenheiten des Abbaus in mehreren, parallel betriebenen Steinbrüchen mit geringfügig unterschiedlichen Niveaus in Zusammenhang stehen. Ebenso ist von einer Zwischenlagerung von Rohblöcken auszugehen, die unfertig an die Baustelle geliefert und vor Ort oder nach dem Versetzen fertig gestellt wurden.

Ein wichtiges Indiz für den arbeitsteiligen Prozess ist der Fundort des unfertigen Altars im Steinbruch von Walba. Der Kelheimer Schuttkalk stammt vermutlich aus einem donauaufwärts gelegenen Bruch, während Walba wohl nur als Werkplatz fungierte, an dem die angelieferte Halbware von Steinmetzen und Bildhauern fertiggestellt wurde, bevor man sie an ihren Bestimmungsort lieferte. Die Topografie des Bruchs und seiner Umgebung sind zudem ideal für einen Weitertransport der Blöcke mit Fuhrwerken oder Lastkähnen geeignet, da nur an dieser Stelle ein flach ansteigendes Tal von der Donau hinüber nach Regensburg führt.

Der immense Steinverbrauch bei der Errichtung der Lagermauer um die Castra Regina musste zwangsläufig zur Vergrößerung der bestehenden und zur Erschließung neuer Steinbrüche im Bereich um Kelheim und Saal geführt haben. Dies

hatte wegen der klassischen Abbautechnik eine Verlagerung der Abbauebene in geologisch höher gelegene Sedimentationsschichten zur Folge, was wiederum zu einem verstärkten Abbau der in den höchsten Niveaus anstehenden, leichter zu bearbeiten Grünsandsteine führen musste. Aus diesem Befund ließe sich zwanglos die bevorzugte Verwendung des weicheren Sandsteins als Massenware für den Mauerbau ableiten.

Für die Qualität der an der porta praetoria verwendeten Kalksteine gilt generell, dass der Kelheimer Schuttkalk die höchste Qualitätsstufe von Naturwerksteinen in der näheren Umgebung von Regensburg darstellt. Diese Qualität ist daher auch in der vertikalen Abfolge der Reihen der Naturwerksteine (I, II, III, IV und V) an der Außenmauer des Turmes zu finden. Dies bedeutet eine vertikale, lagenweise Veränderung der Qualität, der Porosität, der Matrixgehalte und der Partikelgröße, an der sich künftige Restaurierungsmaßnahmen orientieren können. Glücklicherweise muss man nicht Stein für Stein gesondert betrachten. Vielmehr kann man die mittleren petrographischen Charakteristika eines bestimmten Horizontes (Steinlage) als Maßstab für die Anwendung gezielter Maßnahmen verwenden.

Bleibt festzustellen, dass sich die aus den Bildungsbedingungen im Jurameer ererbten Eigenschaften der Naturwerksteine bis heute durchpausen. Sie beeinflussen die Witterungsbeständigkeit der Quader, definieren die Schadensbilder und haben einen entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit der heute zu applizierenden Konservierungsmittel.

#### Literatur

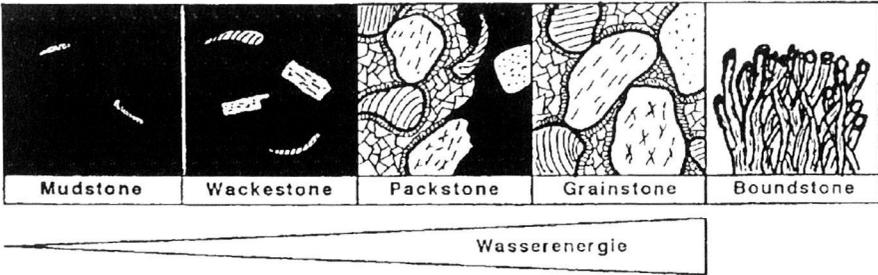
- v. Ammon (1875) in : Bauberger, W., Cramer, P. & Tillmann, H. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6938 Regensburg. – 414 S., 33 Abb., 17 Tab., 9 Beilagen, München, Bayer. Geol. Landesamt.
- Barthel, K. W. (1964): Zur Entstehung der Soinhofener Plattenkalke (unteres Untertithon). – Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. hist. Geol., 4: 37–69, München.
- Bauberger, W., Cramer, P. & Tillmann, H. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6938 Regensburg. – 414 S., 33 Abb., 17 Tab., 9 Beilagen, München, Bayer. Geol. Landesamt.
- Bausch, W. M. (1980): Tonmineralprovinzen in Malmkalken.- Erlanger Forschungen, Naturwiss. u. Medizin, B 8, 78 S., 33 Abb., 30 Tab., Erlangen.
- Bausch, W. M. (1987): Significance and interpretation of the Silt/Clay ratio in insoluble residues of limestones. – Chem. d. Erde, 46, 329–335, 8 Abb., Jena.
- Becker, A. (1991): Mikrofazielle Untersuchungen im Weißjura Süddeutschlands, Bohrung KB 84 (Herrlingen, Schwäbische Alb). – Unveröffentl. Diplomarbeit, Univ. Heidelberg, 102 S., 12 Abb., 18 Taf., Heidelberg.
- Below, A. (1988): Mikrofazielle und diagenetische Entwicklung der Gesteine der KB 75 (Herrlingen, Schwäbische Alb) und Korrelation der Faziestypen mit dem Gamma Ray Log. – Unveröffentl. Diplomarbeit, Univ. Heidelberg, 88 S., Heidelberg.
- Blank, C. (1998): (A) Zur Faziesabhängigkeit von Porosität und Permeabilität unter Berücksichtigung der Diagenese in Malmkarbonaten des „Burgsteins“, Südliche Frankenalb/Dollnstein. (B) Stratigraphische Neuaufnahme und Fazieskartierung 1:5000 des Gebietes Eberswang, Dollnstein, Breitenfurt. – Unveröffentl. Diplomarbeit Univ. Erlangen, 104 + V S., 39 Abb., 16 Tab., 37 Taf., 2 Anl., Erlangen.
- Choquette, P.W. & Pray, L. C. (1970): Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. – AAPG, Bull. 54/2; 207–250, Tulsa.

- Dietz, K. & Fischer, T. (1996): Die Römer in Regensburg, 123 S., Pustet, Regensburg.
- Dimke, M. (1997): In: Koch, R., Flügel, E., Dimke, M., Hasselmeyer, B., Michel, U., Rossner, R. & Sobott, R. (1997): Die „Angewandte Faziesforschung“ am Institut für Paläontologie in Erlangen. – Zbl. Geol. Paläontol., H. 9/10, 989–1032, Stuttgart.
- Dunham, R., J. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. – In: Ham, W. E. (ed.): Classification of carbonate rocks. Mem. Assoc. Petrol. Geol., 1: 108–121, 7 Plates, Tulsa.
- Flügel, E. (1978): Mikrofazielle Untersuchungsmethoden von Kalken. – 454 S., 68 Abb., 57 Tab., 27 Taf., Berlin (Springer).
- Flügel, E. (1982): International symposium on fossil algae; guidebook. – 229 pp., Erlangen.
- Flügel, E. (1981): „Tubiphyten“ aus dem fränkischen Malm. – Geol. Bl. NO-Bayern, 31, 126–142, Erlangen.
- Flügel, E. & Steiger, T. (1981): An Upper Jurassic sponge-algal buildup from the Northern Franconian, West Germany. – SEPM Spec. Publ., 30, 371–397, Tulsa.
- Folk, R. L. (1959): Practical petrographic classification of limestones. – Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 43: 1–38, Tulsa.
- Folk, R. L. (1962): Spectral subdivision of limestone types. – In: Ham, W. E. (ed.): Classification of carbonate rocks. Mem. Assoc. Petrol. Geol., 1: 62–84, Tulsa.
- v. Freyberg, B. (1966): Zur Geologie des Weißen Jura zwischen Solnhofen und Eichstätt (Mfr.). – Erlanger geol. Abh., 61, 20 S., Erlangen.
- Fritz, G. K. (1958): Schwammstotzen, Tuberolithe und Schuttbreccien im Weißen Jura der Schwäbischen Alb. – Arb. Geol. Paläontol. Inst. Stuttgart, 13, 1–119, Stuttgart.
- Füchtbauer, H. (Hg.) (1988): Sedimentpetrologie Teil II – Sedimente und Sedimentgesteine. – 4. Aufl., VI + 1141 S., 660 Abb., 113 Tab., Stuttgart (Schweizerbart).
- Geyer, O. F. (1962): Über Schwammgesteine (Spongiolithe, Tuberolithe, Spiculit und Gaizit). – Herrmann-Aldinger-Festschrift, 51–59, Stuttgart.
- Gressly, A. (1838): Observations géologiques sur le Jura Soleurois. – Neue Denkschrift der allgemeinen schweizerischen Gesellschaft für Naturwissenschaften, 2, Neuchatel.
- Gwinner, M. P. (1976): Origin of the Upper Jurassic of the Swabian Alb (Southwest Germany). – Contrib. Sedimentol., 5, 1–75, 66 Figs., Stuttgart (Schweizerbart).
- Haßelmann, F. (1888): Die Steinbrüche des Donaugebietes von Regensburg bis Neuburg. – 42 S., München.
- Haßelmann, F. (1892): Vortrag über geologische und geognostische Verhältnisse der Steinbrüche zu Kapfelberg und Poikam. – 16 S., Regensburg.
- Hecker, T. M. (1997): Stratigraphische und fazielle Kartierung des Malm auf Blatt Dollstein. – Unveröffentl. Diplomarbeit, Univ. Erlangen, 69 S., 10 Abb., 2 Tab., 16 Taf., 4 Anlagen, Erlangen.
- Heeren, K. (1997): Fazielle und diagenetische Entwicklung des Malm gamma-zeta 3 im Raum Solnhofen (Maxberg), Südliche Franconien; unter besonderer Berücksichtigung hydrogeologischer Fragen. – Unveröffentl. Diplomarbeit Univ. Erlangen, 91 S., + VII, 24 Abb., 4 Tab., XVII + XIV Taf., 3 Karten, Erlangen.
- Hiller, K. (1964): Über die Bank- und Schwammfazies des Weißen Jura der Schwäbischen Alb (Württemberg). – Arb. Geol.-Paläontol. Inst. TH Stuttgart, N.F. 40, 190 S., 38 Abb., 4 Tab., 26 Taf., Stuttgart.
- Keupp, H. (1977): Ultrafazies und Genese der Solnhofener Plattenkalke (Oberer Malm, Südliche Franconien). – Abh. Naturhist. Ges. Nürnberg, 37, 128 S.
- Keupp, H., Koch, R. & Leinfelder, R. (1990): Steuerungsprozesse der Entwicklung von Oberjura-Spongiolithen Süddeutschlands: Kenntnisstand, Probleme und Perspektiven. – Facies, 23, 141–174, 3 Taf., 8 Abb., Erlangen.

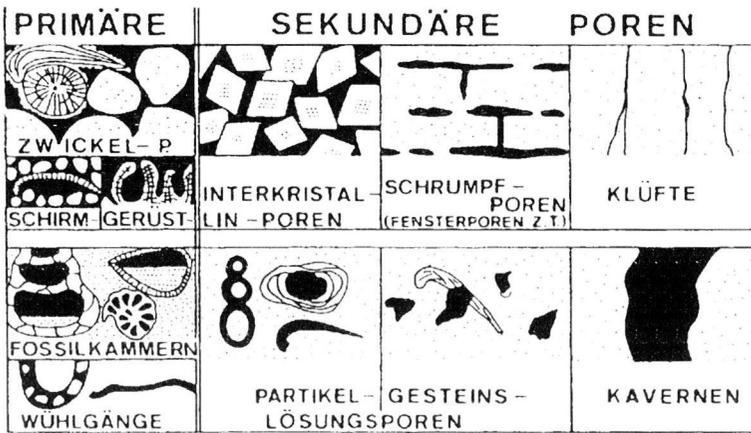
- Koch, R. (1981–1985): Mikrofazielle, sedimentologische Untersuchungen des Stbr. E. Schwenk Nachf. – Herrlingen. Firmeninterner Bericht über die räumliche Verteilung verschiedener Kalksteinqualitäten, Heidelberg.
- Koch, R. (1994): Mittlere Schwäbische Alb (Blautal-Geislingen). Neue Interpretation der Massenkalk; Fazies und Diagenese. – Exkursionsführer zur 146. Jahrestagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Heidelberg „Beckenbildung und -Inversion in Europa. Endogene und Exogene Faktoren“. – 26 S., 21 Abb., 4 Taf., Heidelberg.
- Koch, R. (1997): Daten zur Fazies und Diagenese von Massenkalken und ihre Extrapolation nach Süden bis unter die Nördlichen Kalkalpen. – Geol. Bl. NO-Bayern, 47, H.1–4, 117–150, Erlangen.
- Koch, R. & Senowbari-Daryan, B. (2000): Die fazielle Entwicklung im Steinbruch Blaubeuern/Altental („Michelreibershalde“; Mittlere Schwäbische Alb, Blautal). Karbonatsandfazies des Malm epsilon und Riff-Rutschblöcke des Malm zeta 2. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., 82, 439–467.
- Koch, R. & Zinkernagel, U. (1996): Zur Zementation in Kalksteinen. – Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 1994/H.11/12, 1353–1398, Stuttgart.
- Koch, R. Senowbari-Daryan, B. & Strauss, H.(1994): The Late Jurassic „Massenkalk Fazies“ of Southern Germany: Calcareous sand piles rather than organic reefs. – Facies, 31, 179–208, 8 Abb., 8 Taf., Erlangen.
- Koch, R., Hornung, Th., Pfeifenberger, S., Wagner, K. & Weiss, Ch.(2003): Becken – Hang – Plattform-Übergänge im Kimmeridge 1–3 der Nördlichen Frankenalb (Exkursion F am 24. April 2003). – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. 85, 169–201, Stuttgart.
- Kott, R. (1989): Fazies und Geochemie des Treuchtlinger Marmors (Unter- und Mittelkimmeridge, Südliche Frankenalb). – Berliner Geowiss. Abh., A 111, 115 S., Berlin.
- Leinfelder, R., Krautter, M., Laternser, R., Nose, M., Schmid, D. U., Schweigert, G., Keupp, H., Brugger, H., Herrmann, R., Rehfeld-Kiefer, U., Schroeder, J. H., Reinhold, C., Koch, R., Zeiss, A., Schweizer, V., Christmann, H., Menges, G. & Luterbacher, H. (1994): The origin of Jurassic Reefs: Current research developments and results. – Facies, 31, 1–56. Erlangen.
- Liedmann, W. & Koch, R. (1990): Diagenesis and fluid inclusions of Upper Jurassic spongealgal reefs in SW Germany.- Facies, 23, 241–268, 5 Abb., 7 Taf., Erlangen.
- Meder, K. (1989): Mikrofazies und Diagenese der Karbonatgesteine des höheren Malm (ki 2.4-ti H) in der Bohrung Saulgau GB 3. – Abh. Geol. Landesamt Bad.-Württ., 13, 89–137, 12 Abb., 6 Taf., Freiburg i. Br.
- Meischner, D. (1964): Allodapische Kalke, Turbidite in riffnahen Sedimentations-Becken. – In Bouma, A.H. & Brouwer, A. (eds.): Turbidites. – Dev. in Sedimentology, 3, 156–191, Elsevier, Amsterdam.
- Meyer, R. K. F. (1972): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits (Malm). 1. Teil: Nördliche Frankenalb. – Erlanger Geol. Abh., 91, 28 S., Erlangen.
- Meyer, R. K. F. (1975): Mikrofazielle Untersuchungen in Schwamm Biohermen und – Biostromen des Malm Delta der Frankenalb. – Geol. Bl. NO-Bayern, 25, 149–177, Erlangen.
- Meyer, R. K. F. (1977): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits und der Massenkalk (Malm). 3. Teil: Südliche Frankenalb. – Erlanger Geol. Abh., 104, 40 S., Erlangen.
- Meyer, R. K. F. (1981): Malm (Weißer oder Oberer Jura). – In: Haunschild, H. & Jerz, H. (Hrsg.). – Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000.: 62–68, München (Bayer. geol. Landesamt).
- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1984): Erdgeschichte sichtbar gemacht. Ein geologischer Führer durch die Altmühlalb. – 260 S., Bayer. geol. Landesamt, 2. Aufl., München.
- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1984): Der Jura in neuen Bohrungen in der Umgebung von Regensburg. – Geol. Bl. NO-Bayern, 37, 185–216, Erlangen.

- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1990): Paläogeographie und Schwammriffentwicklung des süddeutschen Malm. – *Facies*, 23, 175–184, Erlangen.
- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1991): Wanderungen durch die Erdgeschichte (II): Durchs Urdonatal nach Eichstätt. – 110 S., Pfeil, München.
- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1993): Wanderungen durch die Erdgeschichte (5): Durch die Fränkische Schweiz. – 167 S., Pfeil, München.
- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1995): Wanderungen in die Erdgeschichte (7): Rund um Regensburg. – 128 S., Pfeil, München.
- Nitzopoulos, G. (1974): Faunistisch-ökologische, stratigraphische und sedimentologische Untersuchungen am Schwammstotzen-Komplex bei Spielberg am Hahnenkamm (Ob. Oxford, Südliche Frankenalb). – *Stuttgarter Beitr. Naturk., Ser. B*, 16, 143 S., Stuttgart.
- Pomoni-Papaioannou, F., Flügel, E. & Koch, R. (1989): Depositional environments and diagenesis of Upper Jurassic subsurface sponge- and Tubiphytes reef limestones. – *Facies*, 21, 263–284, 5 Abb., 6 Taf., Erlangen.
- Pompeckj (1901): In: Bauberger, W., Cramer, P. & Tillmann, H. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6938 Regensburg. – 414 S., 33 Abb., 17 Tab., 9 Beilagen, München, Bayer. Geol. Landesamt.
- Quenstedt, F. A. (1858): Der Jura. – 842 S., 42 Abb., 103 Taf., Tübingen (Laupp).
- Roll, A. (1934) Form, Bau und Entstehung der Schwammstotzen im süddeutschen Malm. – *Paläontol. Z.*, 16, 197–246, Berlin.
- Rutte (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 7037 Kelheim. – 243 S., Bayer. Geol. Landesamt, München.
- Schauer, M. (1998): Dynamische Stratigraphie, Diagenese und Rohstoffpotential des Oberjura (Kimmeridge 1–5) der Mittleren Schwäbischen Alb. – *Tüb. Geowiss. Arb., A* 36, 135 S., Tübingen.
- Schönenberger (1968): In: Dietz, K. & Fischer, T. (1996): Die Römer in Regensburg, 123 S., Pustet, Regensburg.
- Schaller, J. & Koch, R. (1996): Der Massenkalk des Schaufelsen im Oberen Donautal. Peloid-Lithoklast-Ooid Krustenkalk oder Schwammriff-Komplex? (Malm  $\delta$  4 und Malm  $\epsilon$ ). – *Jber. Mitt. Oberrhein geol. Ver., N.F.* 78, 309–358, 6 Abb., 4 Taf., Stuttgart.
- Schorr, M. & Koch, R. (1985): Fazieszonierung eines oberjurassischen Algen-Schwamm-Bioherms (Herrlingen, Schwäbische Alb). – *Facies*, 13, 227–270, 11 Abb., 6 Taf., Erlangen.
- Viohl, G. (1983): Forschungsprojekt „Solnhofener Plattenkalke“. – *Archaeopteryx*, 1983: 3–23.
- Viohl, G. (1998): Die Solnhofener Plattenkalke – Entstehung und Lebensräume. – *Archaeopteryx*, 16: 37–68, Eichstätt.
- Wagenplast, P. (1972): Ökologische Untersuchungen der Fauna aus Bank- und Schwammfazies des Weißen Jura der Schwäbischen Alb. – *Arb. geol. pal. Inst. Stuttgart, N.F.*, 67, 1–99, 10 Abb., 5 Tab., 18 Taf., Stuttgart.
- Wehner, C. (1998): Geologische und fazielle Kartierung (1:5000) des Malms südöstlich von Solnhofen (Südliche Frankenalb; Malm zeta1). – Unveröffentl. Diplomarbeit Univ. Erlangen, 53 S., 15 Abb., 7 Taf., 3 Karten. Erlangen.
- Wirsing, G. & Koch, R. (1986): Algen-Schwamm-Bioherme des Flachwasser-Bereiches (Schwäbische Alb, Weißjura Delta 3). – *Facies*, 14, 285–308, 5 Taf., 8 Abb., Erlangen.
- Zeiss, A. (1964): Geologie des Malm auf Gradabteilungsblatt Dollnstein (Südliche Frankenalb). – *Erlanger geo. Abh.*, 55, 43 S., Erlangen.
- Zeiss, A. (1977): Jurassic stratigraphy of Franconia. – *Stuttgarter Beitr. Naturk., B* 31, 32 S., 8 Abb., Stuttgart.

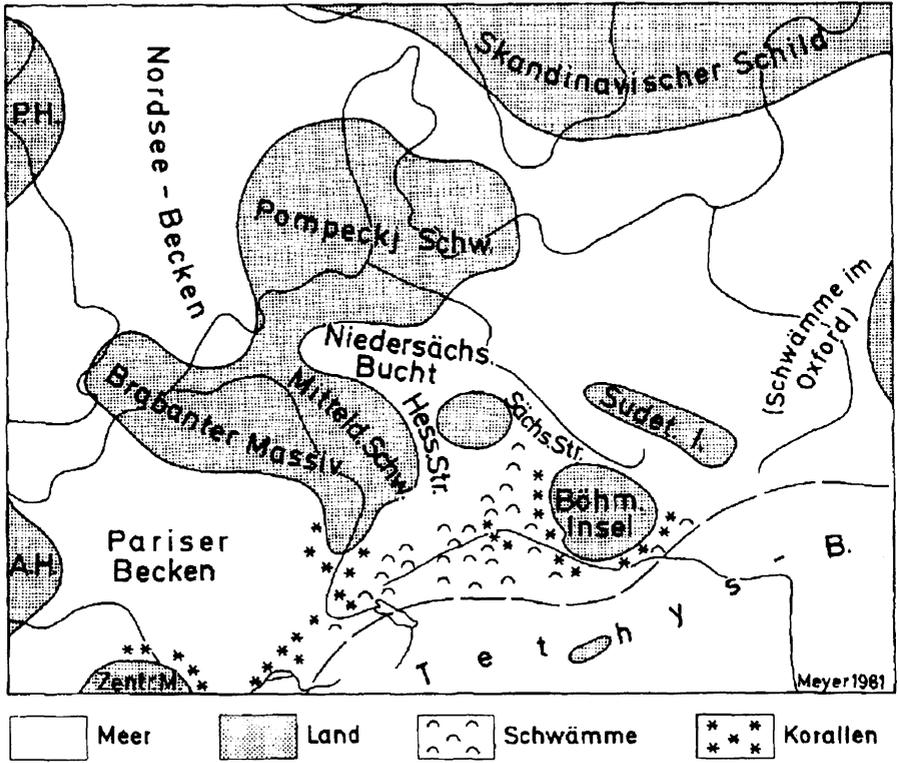
Abb. 35 a und b (Farbabbildung) am Schluss des Beitrages, S. 192 u. 193



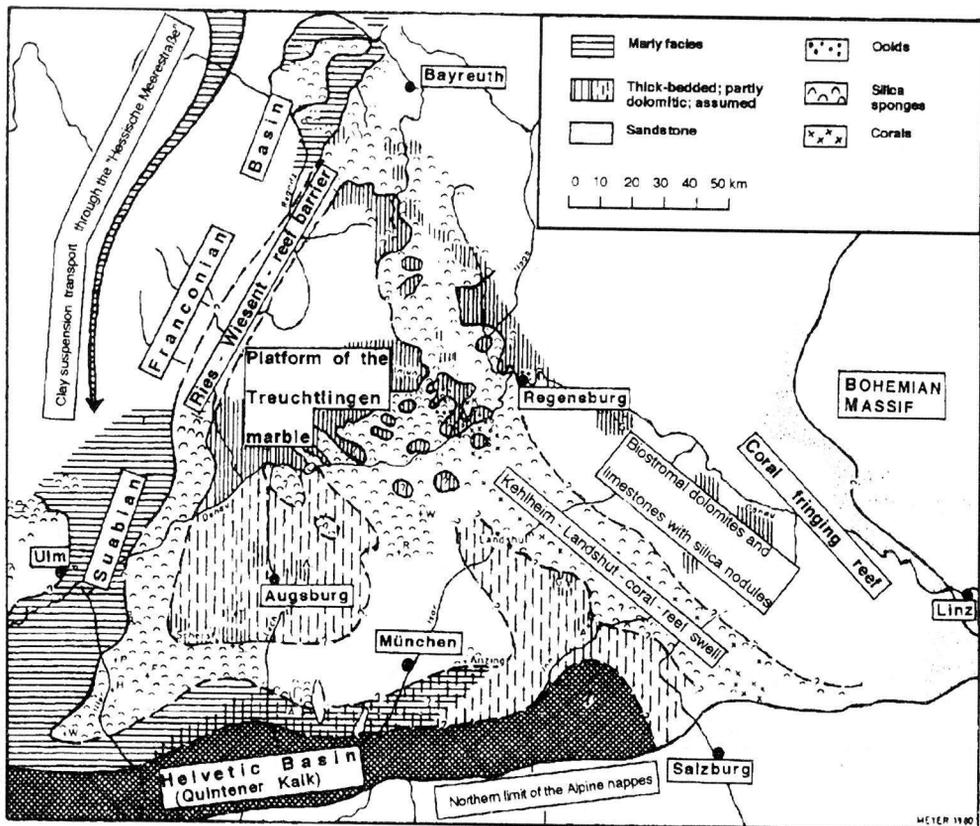
36: Gesteinsnamen (Carbonatklassifikation) und ihre Beziehung zur Wasserenergie im Ablagerungsraum und den damit verbundenen Matrixgehalten, in denen die „Nichtcarbonate“ zu finden sind (Mikrit: schwarz; Komponenten: hell mit Muster; frühe marine allseitige Zemente: gestreift; spätere granulare Zemente: körnig (aus Koch et al. 1999, in Anlehnung an Dunham 1962).



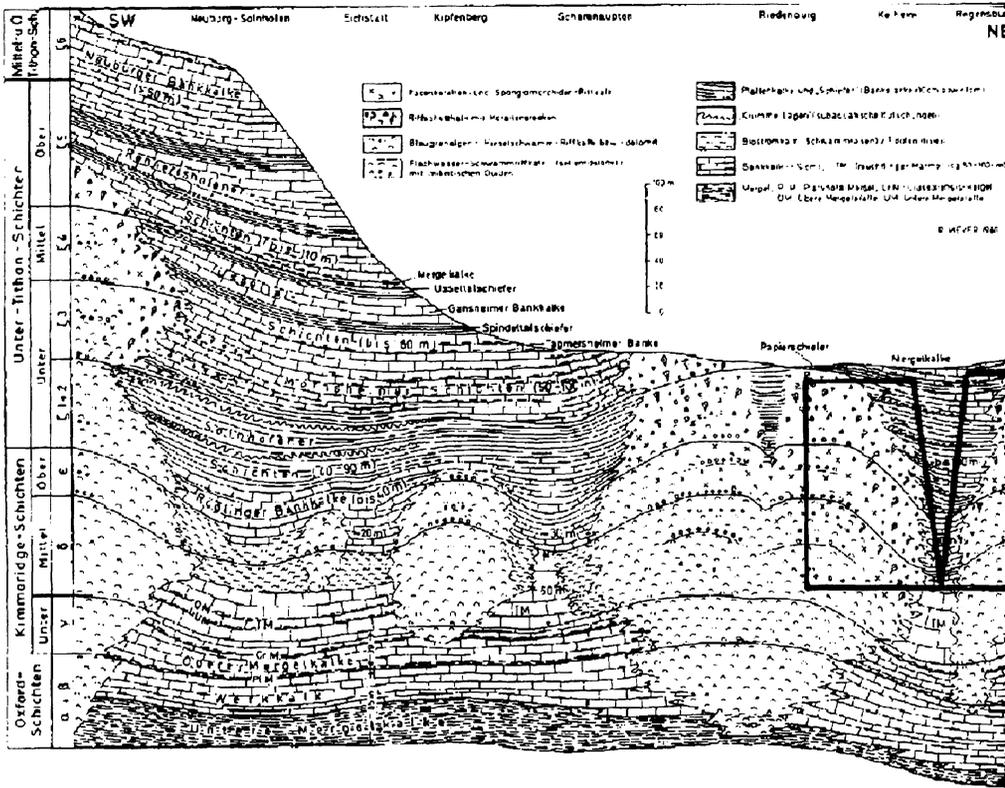
37: Die Porentypen in Kalksteinen (Füchtbauer 1988) in Anlehnung an Choquette & Pray (1970). Es wird zwischen sogenannten gefügeabhängigen (primären) und gefügeunabhängigen (sekundären) Poren unterschieden. Ferner wird deutlich, dass es in Carbonatgesteinen Porentypen gibt, die gut oder sehr schlecht, oder auch gar nicht miteinander verbunden sein können, was sich erheblich auf die Permeabilität auswirkt. Die Porenräume sind schwarz, während mikritische Matrixanteile hell gepunktet erscheinen.



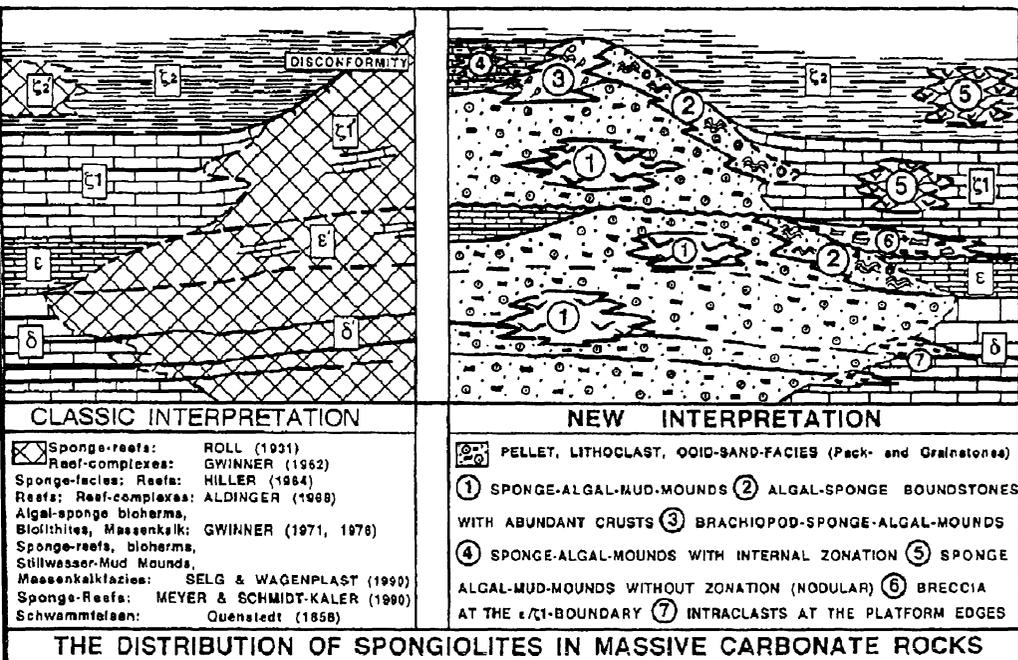
38: Verteilung von Land und Meer im Mittleren Weißjura. Das Böhmisches Festland ist bis auf eine kleine Insel überflutet. Im breiten und warmen Schelfmeer sollen sogenannte Schwammriffe wachsen. Nur vor der Böhmisches Insel und im Schweizer Jura siedeln schon Korallen (nach Meyer & Schmidt-Kaler 1995).



39: Für den hier behandelten Sedimentationsraum des Malm in der südlichen Frankenalb maßgebender Ausschnitt aus der Darstellung der Paläogeographie im Malm-Delta 1+2 (Treuchtlinger Marmor) (aus Meyer 1981).

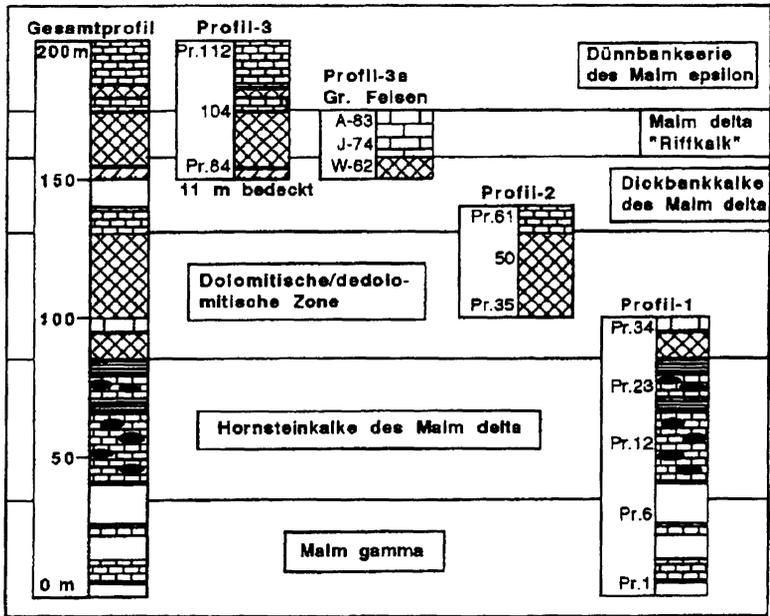


40: Die Entwicklung des Malm in der Südlichen Frankenalb (aus Meyer & Schmidt-Kaler 1990). Für die Kalke der porta praetoria sind besonders die Sedimentgesteine des Malm-Delta, Malm-Epsilon und des Malm-Zeta von Bedeutung. Besonders im Raum Kelheim - Regensburg sind markante vertikale und laterale Übergänge von sogenannten Flachwasser-Schwammkalken mit Ooiden zu Tubiphytenkalken und zu Rifffschuttalken mit Korallen anzutreffen, wie sie in den beiden eingefügten senkrechten Rahmen beispielhaft angedeutet sind.

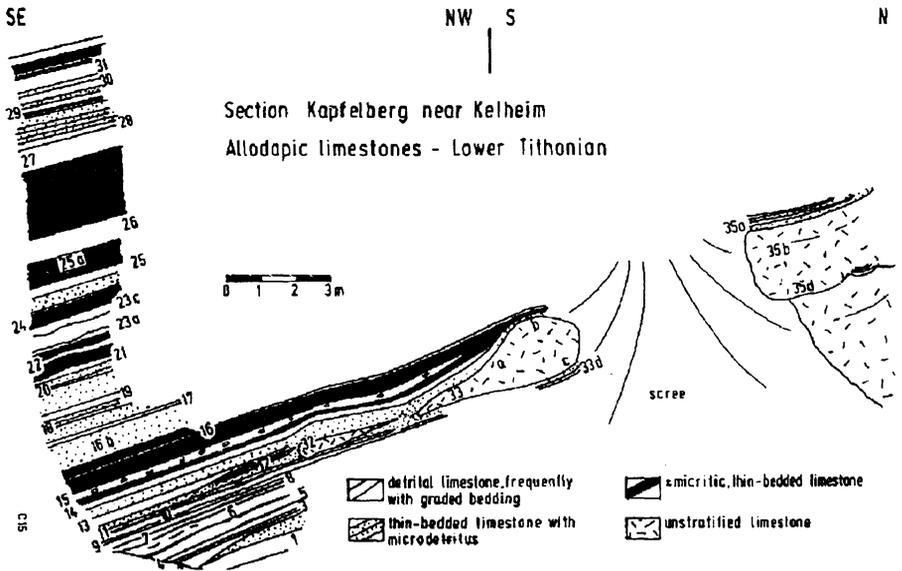


### THE DISTRIBUTION OF SPONGIOLITES IN MASSIVE CARBONATE ROCKS

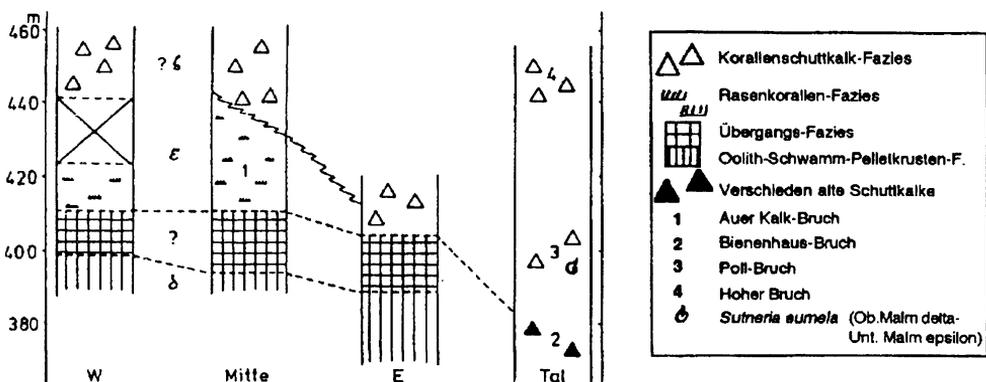
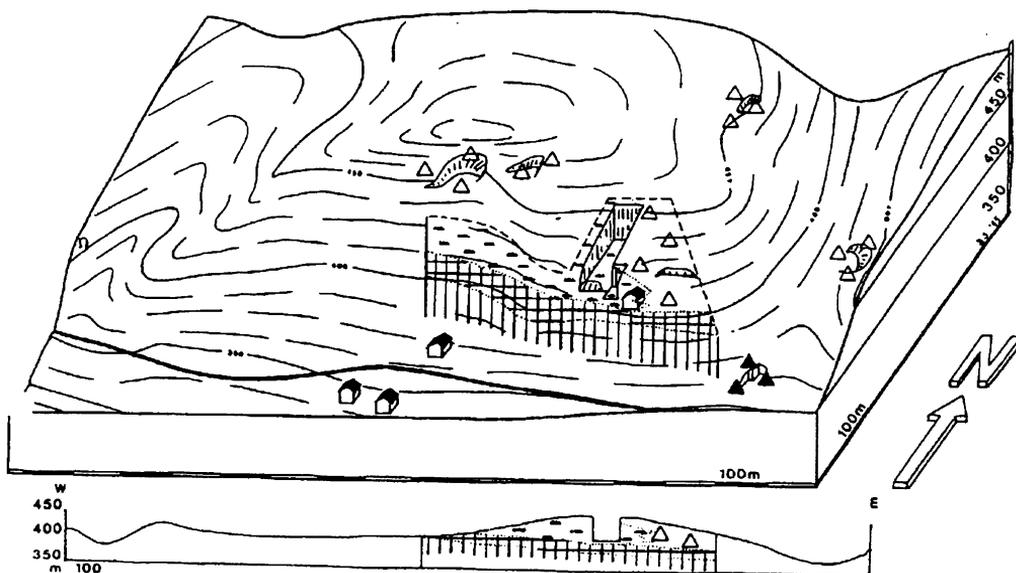
41: Die Verteilung von Schwammriffen in Massenkalken. Peloid-Lithoklast-Ooid-Carbonatsande haben volumetrisch den größten Anteil (etwa 70%) an ihrem Aufbau. Die räumliche Verteilung „echter Schwammriffe“ (Algal-sponge-buildups) innerhalb dieser Carbonatsandfazies, an ihrem Rand und in den assoziierten etwas tieferen Bereichen (Becken) ist durch hydrodynamische Bedingungen gesteuert, die jeweils durch die Ablagerung und wahrscheinlich auch durch Wanderungen dieser Sande verändert werden. Die Malm epsilon/zeta 1 Grenzbekzie markiert ein regressives Maximum. Das rasche Wachstum der Brachiopoden-Algen-Schwamm-Mounds im Malm zeta wird durch eine transgressive Entwicklung begünstigt. 1 = Schwamm-Algen-Mounds, 2 = Algen-Schwamm-Boundstones, 3 = Brachiopoden-Algen-Schwamm-Mounds, 4 = zonierte Schwamm-Algen-Mounds, 5 = „nodulare“ Schwamm-Algen-Mounds, 6 = Malm epsilon/zeta 1 Grenzbekzie, 7 = Intraklastkalke am „Plattformrand“ (Koch et al. 1994).



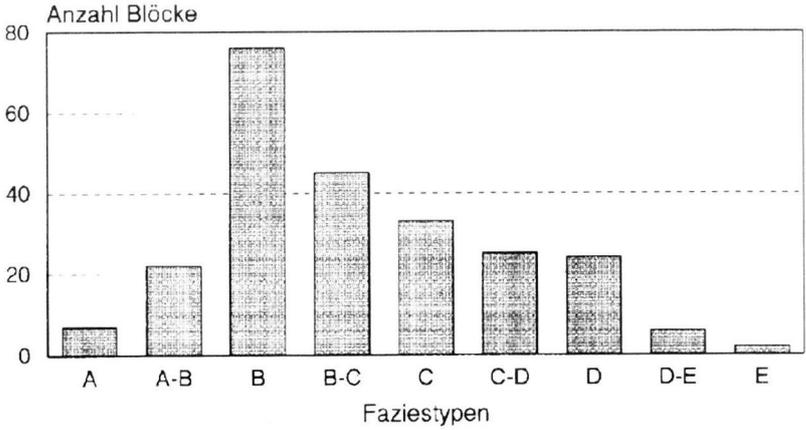
42: Relative Lage der einzelnen Profile am Keilberg zueinander. Die einzelnen Profile können zu dem links dargestellten Gesamtprofil zusammengestellt werden, welches das stratigraphische Intervall vom Malm-Gamma bis zu den Dünnbankserien des Malm-Epsilon umfasst. Die hangenden Massenkalk des Malm-Epsilon werden hier nicht abgehandelt.



43: Das von Flügel (1975) publizierte Profil im Steinbruch Kapfelberg (Lower Tithonian) mit allodapischen Kalken eingeschaltet in Plattenkalken und kleinen fleckenhaften Riffen (Patch-Reefs).

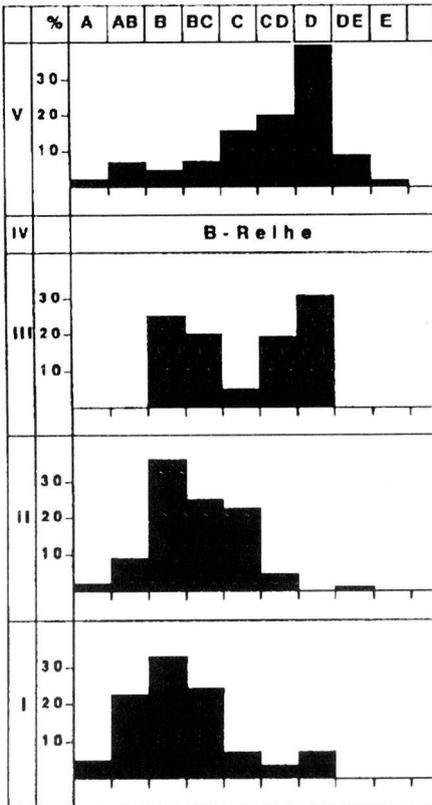


44: Verteilung der verschiedenen Fazieszonen im Gelände der Firma Teich (Oberau bei Kelheim) und im östlich anschließenden Tal sowie schematisierte Profile durch das Untersuchungsgebiet (nach Flügel 1995; pers. Dokumentation).



Anzahl der Blöcke: 240

45: Die Häufigkeitsverteilung der fünf makroskopisch ermittelten Faziestypen zeigt ein deutliches Überwiegen des Typs B. An zweiter Stelle ist Typ C vertreten, es folgen D, A und E. Insgesamt wurden 240 Blöcke ausgewertet.



46: Verteilung der verschiedenen makroskopisch ermittelten Faziestypen in den fünf unterscheidbaren Bau-Lagen der porta praetoria von unten nach oben.

Mächtigkeit (m)	Lithologische Beschreibung im Raum Regensburg	Schicht - Fazies	Tafelbank - Fazies	Rifftrand - Fazies	Riff - Fazies	Alter Malm-
		gut geschichtet	undeutlich ebenschiehtige Biostrom-Fazies	unregelmäßig geschichtet bis massig	massige Biohermafazies, oben schuttreich	
		Mergelkalke, Papierschiefer				Zeta 3
ca. 10	Plattenkalke (weitgehend abgebaut; nur noch zuoberst im Steinbruch Büechl)	Plattenkalke, krumme Lagen, Fossilschuttbanken				Zeta 1+2
30 - 50	Tafelbankige bis massige Riffschuttkalke, mit Schwämmen und Ooiden, oben Korallen	Bankkalke mit Kieselplatten	Schwamm-bänke, z.T. dolomiti-siert	Keilheimer Korallen-Schuttkalk	In Korallenkalk übergehend, selten dolomiti-siert	Epsilon
80 - 100	Horizontal gegliederte Schwammkalke z.T. dolomiti-siert, unten Dickbänke mit Hornsteinen	Treuchtlinger Marmor	Schwamm-bänke, z.T. dolomiti-siert		Schwammkalke und -dolomit	Delta
26	Bankkalke, Mergel-Zwischenlagen, Hornsteine					Gamma
50	Oben helle Bankkalke, unten Mergelzwischenlagen, Glaukonitbank					Beta Alpha

Tab. 1: Lithographische Untergliederung des Malm und Mächtigkeiten der einzelnen Schichten im Raum Regensburg und in der weiteren Umgebung (aus Meyer & Schmidt-Kaler 1995). Die für die Naturwerksteine der porta praetoria wahrscheinlich relevanten Schichtpakete sind hervorgehoben.

Mächtigkeit (m)	Stratigraphie	Kurzbeschreibung
30 – 50	Malm-Epsilon	Umfasst die Dünnbankserie (direkt über dem "Großen Felsen" und die oberen Massenkalken
ca. 98	Malm-Delta	Mit den liegenden Hornsteinkalken, den mittleren Dickbankkalken und dem hangenden "Riffkalk" des "Großen Felsens"
ca. 27	Malm-Gamma	Dolomit und Mergel

Tab. 2: Mächtigkeit, stratigraphische Unterteilung und Kurzbeschreibung der im Richtprofil des Keilbergs untersuchten Schichten des Malm.

Stratigraphie		Kurzbeschreibung
w ζ	Malm-Zeta	Plattenkalkstein
w ε - ζ1, ko	Malm-Epsilon bis Zeta 1	Korallenkalkstein
w ε - ζ1, d	Malm-Epsilon bis Zeta 1	Massiger Dolomitstein
w ε - ζ1, kma	Malm-Epsilon bis Zeta 1	Massenkalkstein (Plumper Felsenkalk), Dolomiteinschlüpfungen
w ε	Malm-Epsilon	Bankkalkstein
w δ d	Malm-Delta	Dolomitstein
w δ	Malm-Delta	Bankkalksteine mit Hornsteinen
w χ	Malm-Gamma	Bankkalksteine
w β	Malm-Beta	Bankkalksteine mit Mergellagen
w α	Malm-Alpha	Plattiger Mergelstein

Tab. 3: Die auf der Geologischen Karte von Bayern (Blatt 6938, Regensburg-West) angegebenen Schichten des Malm. Die aufgrund der makroskopischen Untersuchung eventuell in Frage kommenden Kalksteintypen sind markiert.

Lage	A	AB	B	BC	C	CD	D	DE	E
	dicht, feinkörnig,  M-W		dicht, feinkörnig, bioklast. Kalk  W-P		mittelkörnig, gut sortiert, bioklast. Kalk P-G, F-R		mittelgrobkörnig, gschlecht sortiert, bioklast. K. P-G, F-R		feinkörnig, große Komponenten Intra-Biokl. F
V	-	2	7	5				9	2
IV - B - Reihe aus relativ homogenem Kalkstein mit Relief									
III	-	-			5	19		-	-
II	2	9				5	-	1	-
I	5				7	3	7	-	-

Tab. 4: Prozentuale Verteilung der makroskopisch ermittelten Faziestypen (Angabe in %).

## ANHANG Teil B: Die Kalksteine an der porta praetoria

Anhang 1: zit. nach Bauberger et al. (1969):

„Der Plumpe Felsenkalk tritt als schmales Band in den unteren Hangteilen des Donau-, Naab- und Regentales auf. Seine größte flächenhafte Verbreitung findet sich im Bereich des Keilberges. Nördlich von Schwabelweis, am Fuß des „Großen Felsens“ beginnt der Plumpe Felsenkalk mit einer 7 m mächtigen Zone aus Dolomit, der gelbbraun verwittert und zerfällt. Über dieser folgen helle, massige Kalksteine (15–20 m), die aufwärts wieder von ausgesprochen dolomitischen Kalksteinen abgelöst werden. Diese Dolomitzone ist aber nicht durchgehend entwickelt und erscheint örtlich nur in Form von Dolomitlagen und -linsen.

Westwärts zwischen dem „Großen Felsen“ und dem Kalkwerk „Steine und Erden“ (vormals Funk) wird ein Teil dieser dolomitischen Partien von teils massigen, teils grob gebankten, hellen und dichten, auch rötlich gefärbten und zuckerkörnigen Kalksteinen (30 m) mit Hornsteinlagen abgelöst.

Erst darüber ist der eigentliche Plumpe Felsenkalk entwickelt (40–50 m). An der Südwestecke des Keilberges durch einen Steinbruch erschlossen, zeigt er dort seine von der Verkarstung geprägten Formen mit zahlreichen bis unter die Steinbruchsohle herabreichenden Spalten, Trichtern und Wannern, welche mit Ablagerungen der Oberkreide (Schutzfelsschichten des Mittleren Cenoman, Grünsandsteine des Oberen Cenomans und Reinhausener Schichten des Unteren Turons) gefüllt sind. An der Brucheinfahrt wittern an alten Kluftwänden tellerförmige Kieselschwämme heraus. Auch höher in der Schichtfolge lassen sie sich noch beobachten, z. T. treten auch kreisrunde, dunkle Querschnitte von Becherschwämmen in den weißen Kalken auf. Die dunklen Algenkrusten, die sonst das Riffgerüst bilden, fehlen hier weitestgehend.

Deutlich erkennbar sind nur die weißen „Flämmchen“ der Tubiphyten. Erst im Dünnschliff zeigt sich der Aufbau des Kalkes aus Ooiden, Onkoiden und Feinschutt-Lagen. Die höchsten Partien des Steinbruchs enthalten neben Brachiopoden, Muscheln, Crinoiden- und Seeigelresten auch Korallenstöcke und Kalkschwämme.

In der Gesteinsfazies des Plumpen Felsenkalkes herrscht ein massiger, dichter, weißer bis gelblicher Kalkstein mit splittrigem bis muscheligem Bruch vor. Selten sind körnige Massen von dunkler bis rötlicher Farbe. Nur in den oberen Partien tritt eine unregelmäßige grobe Bankung auf. Hin und wieder sind Hornsteinknollen zu bemerken. Nicht selten ist das Gestein von kalzitverheilten Äderchen oder auch von kleinen Hohlräumen durchsetzt. (...) Der Plumpe Felsenkalk ist von riffbildenden und riffbewohnenden Lebewesen wie Kalkalgen, Schwämmen, Hydrozoen, Brachiopoden, Muscheln, Seeigeln u. a. anderen aufgebaut worden. Die Riffbildungen haben sich im Lauf ihres organischen Wachstums bis 100 m über den umgebenden Meeresboden erhoben, was in der größeren Mächtigkeit der Schwammriff-Fazies gegenüber der sich gleichzeitig bildenden Schichtfazies zum Ausdruck kommt. In den zwischen den Riffbauten gelegenen Schüsseln ist Kalkschlamm sedimentiert worden, dessen Ablagerung auch nach Erlöschen des Riffwachstums während des Malm-Zeta angehalten und die Riffe als Plattenkalk-Fazies überdeckt hat.“

Anhang 2: Keilberg – Zusammengesetztes Profil 1 und 2

<b>Keilberg - Profile 1 und 2 - Dünnstufkürzbeschreibung</b>	
<b>Probe</b>	<b>Gesteinsname (Folk/Dunham)</b>
61	<b>Kristalliner Dolomit</b> ; zu 40% besteht das Gestein aus Calcit (auf Klüften und in Hohlräumen)
60	Tubiphyten-Intrabiopelsparit (P); <b>30 % Dedolomit</b>
59	Dedolomitischer Schwamm-Biolithit (B); <b>90 % Dedolomit</b>
58	Dolomitischer Schwamm-Biopelmikrudit (B-P); <b>Dolomit 30 %; Dedolomit</b>
57	Schwamm-Tubiphyten-Biopelmikrudit; große <b>Dolomithromboeder (30 %)</b>
55	Schwach ausgewaschener Tubiphyten-Biopelsparit (P-G); vereinzelt Ooide (?)
54	Schwach ausgewaschener Tubiphyten-Biopelsparit (P-G); Ooide (?), <b>30 % Dedolomit</b>
51-53A	Dedolomitischer Tubiphyten-Filament-Biomikrit (W-P); <b>70 % Dedolomit</b>
50	Tubiphyten-Filament-Onkobiopelmikrit (P); schwach ausgewaschen
49	Schwamm-Tubiphyten-Filament-Biopelmikrudit (F-P); <b>20 % Dedolomit</b>
48	Schwamm-Biopelmikrudit (F); <b>30 % Dedolomit</b> in Flecken.
46 + 47	Filament-Tubiphyten-Biomikrit (W); <b>70 % Dedolomit</b>
45	<b>Kristalliner Dedolomit; 100 % Dedolomit</b>
44	Filament-Tubiphyten-Biomikrit (W); <b>60 % Dedolomit</b>
43	<b>Kristalliner, pelletoider Dedolomit</b> ; Pseudopellets, Schwammumwandlung (?)
42	Filament-Intrabiopelmikrit (W-P)
41	Filament-Tubiphyten-Biomikrit (W); <b>70 % Dedolomit</b>
40	Tubiphyten-Filament-Schwamm-Biomikrit (W); <b>70 % Dedolomit</b>
38 + 39	<b>Kristalliner Dedolomit; 100% Dedolomit</b>
37	Stark dedolomitischer Schwamm-Biomikrit (W); <b>70 % Dedolomit</b>
35 + 36	<b>Kristalliner Dedolomit; 100% Dedolomit</b>
34	Tubiphyten-Onko-Oobiosparit (Grainstone); mit wenigen Dedolomit-Rhomboedern
33	Tubiphyten-Onko-Oobiosparit (Grainstone); mit wenigen Dedolomit-Rhomboedern
32	Schwach ausgewaschener Oo-Onkopelsparit (Packstone-Grainstone)
30 + 31	<b>Kristalliner Dedolomit; mit Rhomboedern</b>
28 + 29	Schwamm-Krusten-Tubiphyten-Biolithit; Pelmikrit (Boundstone); <b>schwach dolomitisch</b>
27	Schwamm-Tubiphyten Biopelmikrit (Packstone); etwas verkieselt
26	<b>Kristalliner Dedolomit</b> ; teilweise mit Zonarbau der Rhomboeder
25	Schwammnadel-Echinodermen-Biomikrit (Wackestone); mit Filamenten; schwach verkieselt
24	Schwammnadel-Biomikrit (Wackestone)
20	Schwamm-Biomikrudit (Floatstone)
19	Schwamm-Krusten-Biolithit; Biomikrudit (Bound-; Floatstone); mit Filamenten; <b>dedolomitisch</b>
17 + 18	Schwamm-Krusten-Biopelmikrudit; <b>dedolomitisch</b> ; mit Terebella
14	Tubiphyten-Biopelmikrit (Wackestone); mit kleinen Hornsteinknollen
13	Schwamm-Biolithit; Biomikrudit (Boundstone-Floatstone); mit Terebella; dolomitisch
12	Intrabiomikrit (Wackestone-Packstone); <b>dolomitisch</b>
8 - 11	Schwamm-Biomikrudit (Floatstone); dolomitisch und dedolomitisch, mit vielen Schwammnadeln
7	Biomikrit (Wackestone); mit Schwammnadeln, Echinodermen und Foraminiferen
6	Schwamm-Biolithit (Boundstone); <b>dedolomitisch</b>
5	Intrabiomikrit (Wackestone); mit Schwammnadeln, Echinodermen, Foraminiferen; Filamenten
3 + 4	Schwamm-Intrabiopelmikrit (Wackestone-Packstone); Famente; Pellets
2	Schwamm-Krusten-Intrabiomikrudit (Floatstone); <b>dedolomitisch</b>
1	<b>Kristalliner Dedolomit</b>

Anhang 5: Keilberg – Lateralvergleich der Profile 3 und 3a „Großer Felsen“:

Keilberg: Profil 3 - Dünnstufenzbeschreibung			
Probe Nr.	Gesteinsname (Folk/Dunham)		
112	Tubiphyten-Biopelmikrit (W-P); <b>20 % Dedolomit</b>		
111	Tubiphyten-Intrabiopelmikrit (W-P); mit Krusten		
110	Tubiphyten-Intrabiopelmikrit (W-P); mit Krusten		
109	Tubiphyten-Intrabiopelmikrit (P); <b>40 % Dedolomit</b>		
108	Schwamm-Tubiphyten-Intrabiopelmikrit (P); <b>10 % Dedolomit</b>		
107	<b>Kristalliner Dedolomit</b> ; mit Schwämmen		
106	<b>Kristalliner Dedolomit</b>		
105	Tubiphyten-Intrabiopelmikrit (W-P); mit Krusten; <b>10 % poröser Dedolomit</b>		
Keilberg: Profil 3		Keilberg: Profil 3a "Großer Felsen"	
Probe Nr.	Gesteinsname (Folk/Dunham)	Probe Nr.	Gesteinsname (Folk/Dunham)
104	Intrabiopelmikrit (W-P); mit Tubiphyten	A	-
103	Intrabiopelmikrit (W-P); mit Tubiphyten	B	-
102	Krusten-Intrabiopelmikrit; Biolithit (P-B); <b>5 % Dedolomit</b>	C	-
101	Dedolomitischer Tubiphyten-Filament Biomikrit (W); <b>70 % Dedolomit</b>	D-80	Schwach ausgewaschener Intrabiopelsparit (P-G); mit Terebella, Krusten
100	Schwamm-Krusten-Intrabiopelmikrit-sparit	E-79	Schwamm-Filament-Biomikrudit; Biolithit (F+B)
99	Tubiphyten-Intrabiopelmikrit (W-P); <b>40 % Dedolomit</b>	F-78	Schwach ausgewaschener Schwamm-Krusten Intrabiopelsparit (P-G+B)
98	Tubiphyten-Intrabiopelmikrit (W-P); <b>40 % Dedolomit</b>	G-77	-
97	Schwamm-Tubiphyten-Biopelmikrit (W-P); <b>30 % zonare Dolomite</b>	H-76	Schwamm-Tubiphyten-Krusten-Biopelmikrit - sparit( P+B); Spur Dedolomit
96	Schwamm-Tubiphyten-Biopelmikrit (F); <b>20 % zonare Dolomite</b>	I-75	Schwach ausgewaschener Intraonko-oobiopelsparit (P-G); viel Tubiphyten
95	Schwamm-Biomikrudit (F); <b>70 % zonare Dolomithomboeder</b>	J-74	Schwach ausgewaschener Intraonko-oobiopelsparit (P-G); viel Tubiphyten
94	Schwamm-Biomikrudit (F); <b>20 % zonare Dolomithomboeder</b>	K-73	Schwach ausgewaschener Tubiphyten-Intrabiopelsparit (P)
93	Schwamm-Krusten-Biopelmikrit (P+B); <b>10 % Dedolomit</b>	L-72	Schwamm-Biopelmikrudit (W-P, F); <b>15 % Dedolomit</b>
92	Schwamm-Krusten-Biopelmikrit (P+B); <b>40 % Dedolomit</b>	M-71	Schwamm-Mikrudit (F); <b>70 % Dedolomit</b>
92	<b>Kristalliner Dedolomit</b> mit Biomikritresten	N-70	<b>Kristalliner Dedolomit</b>
90	<b>Kristalliner Dedolomit</b>	O-69	Schwamm-Algen-Biolithit (B); <b>90 % Dedolomit</b>
89	<b>Kristalliner Dedolomit</b>	P-68	Biopelmikrit (W); <b>80 % Dedolomit</b>
88	Pelmikrit (P); <b>70 % Dedolomit</b>	R-67	Kristalliner Schwamm-Dedolomit
87	Pelmikrit (P); <b>70 % Dedolomit</b>	S-66	Dedolomitischer Biomikrit (W); <b>80 % Dedolomit</b>
86	Tubiphyten-Biopelmikrit (W); <b>30 % Dolomithomboeder</b>	T-65	Schwamm-Biopelmikrudit (F); <b>25 % Dedolomit</b>
85	Tubiphyten-Biopelmikrit (W); <b>70 % Dolomithomboeder</b>	U-64	<b>Kristalliner Dedolomit</b>
84	Schwamm-Biomikrudit (F); <b>30 % Dolomit</b>	V-63	Schwamm-führender Intraobiopelsparit (P-G).

„Die Massenkalkfazies (MK; Mächtigkeiten 50–80 m) nimmt flächenmäßig ungefähr den gleichen Teil wie die Plattenkalkfazies (PK) ein, beide überwiegend gegenüber der Kelheimer Fazies (Kelheimer Kalk; KK) und dem Dolomit. Im Aufschluß und im Handstück lassen sich zahlreiche lithologische Varietäten beobachten. Auch ist selbst im Dünnschliff oft die Verwechslung mit dem Kelheimer Kalk (KK) möglich. Schichtungsmerkmale sind nur gelegentlich anzutreffen. Aus der Erscheinung im Landschaftsbild mag die für den großzügigen Befund durchaus angebrachte Bezeichnung „Plumper Felsenkalk“ abgeleitet worden sein. (...) Ein Teil der Kalke ist weitgehend organogen, es handelt sich um Schwammbauten, die oft den typischen Kuppelbau zeigen. Tiefere Partien der Steinbrüche der Firma Teich an der Altmühl zeigen das vielfältige Bild von Schwammrasen, Schwammbauten, Schwammstotzen, zwischen denen anorganisch, chemisch gefällte Komponenten abgelagert worden sind (Anm. des Verf.: unter diesem Kalk ist ein Partikelkalk, also Carbonatsande zu verstehen, die aus Peloiden, Intraklasten und biogenen Bruchstücken bestehen; Packstone-Grainstone).

Fossilien treten in den Massenkalken normalerweise nur selten auf (Anm. des Verf.: Dann handelt es sich um feinstpeloide, dichte Kalke; Mikrite). Am ehesten trifft man Brachiopoden und Einzelkelche von Korallen. Manchmal wird der Fossilgehalt jedoch so reichhaltig, dass die Entscheidung, ob Massenkalk oder Kelheimer Kalk, schwer ist.

Ähnlich bankig-massige Kalke stehen auch in den Felsen des Donautales unterhalb der Befreiungshalle an. Vom gegenüberliegenden Ufer sieht man deutlich die Bankung und ein Einfallen in Richtung SE. Diese Lagerungsverhältnisse der Kelheimer Kalke widerspiegelnde Situation (zentripetales Einfallen der Schichten in Richtung Schüsselmitte in der Umgebung von Schüsselrändern) ist (1.) einer der Hinweise, dass nicht alle Massenkalke Schwammkalke i. e. S. sein müssen, (2) ein Hinweis, dass die Bildung von Massenkalken und Kelheimer Kalk auch synchron wenn nicht gar zeitlich hintereinander ablaufen konnten (sonst hätten die geschichteten Absatzkalke der Massenkalkfazies keinen Rahmen gefunden, der gegenüber den tiefer liegenden Schüsseln abstützte; (Anm. des Verf.: Dies ist zwanglos mit lateraler Verzahnung verschiedener Carbonatsandfazies zu erklären).

Echte Schwammbauten, die zur Bildungszeit der Kalke über ihre Umgebung herausragten, dürfte es nicht allzu viele, und diese vorwiegend im SW des Blattbereiches gegeben haben. Ähnliches gilt für die Gesteine der Massenfazies in denen vereinzelt Korallenkelche auftreten, die umgelagert wurden (Anm. des Verf.: Dies erklärt sich mit der neuen Interpretation der Massenkalk, Koch et al. 1994).

Für die Randbereiche der Massenkalkfazies, in Annäherung an die Säume der Plattenkalkschüsseln, können Crinoidenkalk charakteristisch werden. Die zahlreichen weißen Querschnitte der Stielglieder sprenkeln die braune Grundmasse des Handstücks. Ähnliche Varietäten stellt auch der Kelheimer Kalk. Andere Massenkalk zeigen nesterweise die Anreicherung von detritären Komponenten mit reichlich Bryozoenmaterial.

Viele Massenkalk weisen eine charakteristische lebhaftige Färbung auf, die zwischen hellgelb-weiß-honigbraun-schwärzlich wechseln und dann dem Kalk einen Marmoreffekt verleihen können. Stellenweise bergen die Massenkalk, insbesondere die Schwammkalke, Kieselsubstanz in Form von bizarren, löchrig-porösen Konkretionen.

Massenkalk, die ohne Mitwirkung von Schwämmen entstanden, sind gewöhnlich gelblich-weiß, grau oder auch rötlich, mehr oder weniger dicht. Der Bruch ist muscheliger, aber rau, gelegentlich splittrig, das Gestein hält in der Regel größeren Druckbeanspruchungen nicht stand. (Anm. des Verf.: Hierbei handelt es sich um dichte Mikrite, die in vollkommen ruhigen Milieus abgesetzt worden sein müssen).

Im Landschaftsbild bietet die Massenkalkfazies das auffälligste Gestein. Charakteristisch sind die hohen, steilwandigen, oft in einzelne Pfeiler aufgelösten Felsen an den Flanken des Donau-, Altmühl-, und Laabertales. (Anm. des Verf.: Dies ist so nicht mehr haltbar; auch diese Felsen bestehen aus den unterschiedlichsten Faziestypen wie Karbonatsande, dichte Mikrite und kleinere Schwammriffe)

Größere Steinbrüche in Massenkalken – mit dem Übergang in den hangenden Kelheimer Kalk gibt es nur im Bereich diagenetisch nicht verwischter Schwammbauten nördlich der Altmühl.

*In den gewaltigen Steinbrüchen der Firma Teich fallen in den untersten Abbaubereich ideale Schwammkalke an (Anm. des Verf.: Hierzu vgl. Detailaufnahme eines Profils im Teich-Bruch). Die Felsen der Donauenge am Klösterle und am rechten Ufer zwischen Wipfelsfurt und Klösterle, die Felsen am Kartenrand vor Kloster Weltenburg repräsentieren Massenkalk. Im Donautal von Rosengarten bis Lohstadt stehen Massenkalke der verschiedensten Ausbildungen an. Das Tal der Schwarzen Laaber wird auf beiden Seiten von gewaltigen Felsen umsäumt. Im mittleren Ziegelatal sind Schwammkalke weit verbreitet und in mehreren alten Steinbrüchen erschlossen.*

#### *Fossilführung und Alterstellung*

*In den Schwammkalkvarietäten des Altmühltals (Stbr. Teich) tauchen gelegentlich Rhynchonella astieriana und Terebratula insignis neben anderen Zweischalerresten auf. Ansonsten muß die Massenkalkfazies bis auf die Schwämme, Brachiopoden, Einzelkorallen als weitgehend fossilfrei bezeichnet werden, abgesehen von Partien mit Anklängen an die Kelheimer Fazies in den Übergangsbereichen. Diagenetische Umwandlungen mögen die Ursache der auffälligen Fossilarmut sein, sofern nicht das Gestein bereits primär weitgehend frei von Organismenresten war. (Anm. des Verf.: Diese Bemerkung weist bereits darauf hin, dass die Partikelkalkfazies vorherrscht, wie es in der Neuen Interpretation der Massenkalk nach Koch et al. 1994 nachgewiesen wird).*

*Es ist infolgedessen nicht möglich, auf paläontologischem Wege einen direkten Hinweis auf das Alter der Massenkalkfazies zu erhalten. Lediglich in den Beziehungen zu datierbaren anlagernden Serien lässt sich das stratigraphische Niveau als „Bereich Malm-Epsilon bis Malm-Zeta ermitteln.*

#### *Beziehungen zu den angrenzenden Gebieten*

*Im E auf Blatt Bad Abbach spielt die Massenkalkfazies dieselbe Rolle wie auf Blatt Kelheim. Im N auf Blatt Laaber macht sich eine umfangreichere Dolomitisierung des Massenkalkes zum Frankendolomit bemerkbar, aber auch nimmt die grobbankige Ausbildung bedeutende Anteile ein.*

*Im W auf Blatt Riedenburg sind analoge Verhältnisse anzutreffen, die ideale Schwammkalkausbildung ist verbreiteter.*

*Im S auf Blatt Abensberg spielt die Massenkalkfazies im Vergleich zu den anderen Weißjura-Fazies einerseits wie im Vergleich mit den Vorkommen auf Blatt Kelheim andererseits eine bescheidene Rolle. Dies ist vorwiegend mit einem Umschlag in der Faziesverteilung begründet, der entlang einer Linie, die ungefähr mit der Donau zusammenfällt, zu beobachten ist.*

#### *Kelheimer Fazies (Kelheimer Kalke, wζ1)*

*Die Frage der Genese und der zeitlichen Beziehungen zu den benachbarten Fazies und der Lagerung sind auch heute noch nicht mit völliger Klarheit zu übersehen.*

*Die Kelheimer Fazies wird als eine marine Kalkbildung angesehen, deren Entstehung zunächst oder unmittelbar an aufragenden, weitgehend von Schwämmen errichteten Massenkalk-einheiten lag, zuweilen auch auf Schwammkalkböden ruhte. Hier bestanden günstige Lebensbedingungen für riffbauende Organismen: Korallen, Bryozoen, Algen, darin siedelten Brachiopoden, Muscheln, Schnecken, Echinodermen und andere Tiere. Daraus entstanden zoogene Riffkalke. Im Vergleich mit der im folgenden erwähnten Fazies sind sie auf dem Blattgebiet selten.*

*Gleichzeitig bildeten sich am untere Hang, in Richtung auf die Plattenkalk-Schüsseln, die für derartige Verhältnisse typischen Detritus-Sedimente in Übergusschichtung (heutiger Neigungswinkel 10–40°), bestehend aus Trümmern von Massenkalk, zebrochenen und zermahlene n riffbildenden und riffbewohnenden Organismen, angeschwemmten Schalenresten, sowie jenen anorganischen Komponenten, die für derartige Verhältnisse ebenso typisch sind, nämlich Ooide und Kalkumkrustungen kleiner und kleinster Partikel (Anm. des Verf.: Es handelt sich um bioklastische Grainstones und Packstones mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Komponenten, wie sie an der Porta Praetoria überwiegend angetroffen werden).*

Nächst dem Rifftrand überwiegend zoogene Kalke mit einiger Entfernung stellt sich die detritäre Komponente ein. Bei einigen Vorkommen Kelheimer Kalke geht die Riffschuttfazies in die Absatzkalkfazies der Schüsselfüllungen über, die Verzahnung zwischen Riffschuttbänken und Platten bzw. geschichtetem Massenkalk ist verschieden innig und sehr unterschiedlich. Für bestimmte Stockwerke der Schüsselfüllungen sind weitreichende Lagen Kelheimer Kalke charakteristisch. Bei anderen Schüsseln fehlt die Plattenfazies oder sie ist nur als winziger Rest angedeutet, die Schüsseln sind also fast vollständig von Kelheimer Kalcken gefüllt (Anm. des Verf.: Auch hier wird eine sehr gut dokumentierte laterale Faziesverzahnung verschiedener bioklastischer Fazies beschrieben, die entsprechend der Wasserenergie bei der Ablagerung vom „niederenergetischen“ Wackestone zum „hochenergetischen“ Grainstone alles beinhalten kann).

Nicht in allen Fällen sind jedoch Kelheimer Kalke die Überleitung von den Massenkalkkörpern zu den Schüsselfüllungen. Oft ist zu konstatieren, dass die Plattenkalkfazies mit scharfer Grenze, ohne Mitwirkung von Verwerfungen, an Massenkalken abstößt. (Anm. des Verf.: Dies liegt daran, dass die MKe auch eine Partikelkalk-Fazies darstellen und sich nur unterschiedlich energetische Fazies lateral verzahnen).

Andererseits ist ein KK nicht unbedingt ein Riffkalk oder ein Detrituskalk. In den Übergängen zur weitgehend schwammfreien geschichteten MKF stellen sich fast regelmäßig Gesteine ein („Weiße Splitterkalke“), die in dichter Grundmasse nur noch in der Fülle der Fossilien Beziehung zu den KK dokumentieren (Anm. des Verf.: Hier handelt es sich offensichtlich nur um eine laterale, feinkörnigere Variante, die unter sehr geringer Wasserenergie abgelagert wurde). Verschiedentlich lässt sich in gleitenden Übergängen zwischen MK und KK nachweisen, dass die Entwicklung beider Fazies synchron ablief. Die gilt vor allem für jene MK in der Nähe von Plattenkalk-Schüsseln, die schichtige, bankige Absonderungen aufweisen. Gewöhnlich fallen die Schüttungen der KKe vom Riffkern bzw. Riffkranz weg. Dies kann ein Abbild der primären Übergusschichtung sein, oder ist u. U. im Gefolge von Setzungen im Raum der Schüsseln zu deuten.

Die heutige Altmühl charakterisiert eine der häufigen Knickstellen im Falle der KK-Lagen zwischen zwei Kuppeln (Anm. des Verf.: Es handelt sich um eine starke Faziesverzahnungen mit vielen Änderungen auf kleinstem Raum).

Die Verbreitung hält sich mit den größeren Vorkommen an die Umgebung der Stadt Kelheim. Hauptgebiete sind die Flanken des unteren Ziegeltales, die Umgebung von Ihrlerstein, das Weltenburger Holz, die Umgebung von Saal. Weitere KKe liegen bei Alkofen, gegenüber im Str. sw. Kapfelberg, im Fuchsgrund-Kirchenholz u. a. kleinere Vorkommen.

An Mächtigkeit sind im W des unteren Ziegeltales nahezu 100 m Kelheimer Kalk durch die Talflanke angeschnitten. Die übrigen Aufschlüsse des Blattgebietes bieten nur Ausschnitte einer unvollständig erschlossenen, maximal 60 m mächtigen Folge oder Reste auch primär sicherlich geringfügiger Vorkommen. Die höchsten KKe liegen im S in 470–480 m NN, die tiefsten in den Bohrungen der SÜDDEUTSCHEB ZELLWOLLE in 340 m NN.

#### *Petrographische Beschreibung*

Die Kalke der Kelheimer Fazies haben im Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Nutzung oder aufgrund der Fossilien verschiedene Bezeichnungen erhalten (Kelheimer Marmor, Kelheimer Marmorkalk, Diceraskalk, Marmorkalk, Bildmarmor, Bausteinkalk, Korallenkalk von Kelheim, Löcherkalk, Sternkorallenkalk).

Dennoch fällt es meist nicht schwer, einen KK als solchen anzusprechen, da eine Fülle von Merkmalen ihn charakterisiert, wie z. B.:

1. die nie fehlenden Organismen oder deren Reste
2. die Vergesellschaftung der Organismenkomponenten mit MK-Detritus und Organismendetritus
3. das Vorhandensein von Ooide und umkrusteten Kleinkomponenten
4. der meist beachtliche Anteil an Hohlräumen, der aber auch fehlen kann – all dies auf engstem Raum einem ständigen Wechsel unterworfen

5. Kelheimer Kalke zeigen ferner fast immer Schichtung meist in Form von klotzigen, massig absonderrnden, oft mächtigen Lagen; 2–3 m für die Bänke ist ein Durchschnittswert.

Diagenetische Umprägung lassen stellenweise grobkristallinische Partien entstehen, die Auflösung von Fossilien vermehrt die Zahl der Hohlräume. Verwitterte KKe sind oft reinweiß-kreidig und mürbe, andere sind durch Eiseninfiltrationen rotbraun eingefärbt. Ein verwitterter Kelheimer Kalk ist umso löchriger, je mehr Fossilien er birgt.

Eine chemische Analyse KKes aus dem Stbr. w. Ihrlerstein ergab nach Gümbel (1891) 99,5 %  $\text{CaCO}_3$ , 0,5 % MgO. In BOGL (1936, S. 101) wird die Druckfestigkeit mit 285, 485, 590 und 781  $\text{kg/cm}^2$  angegeben – Hinweis auf die verschiedenen Gesteinsvarianten mit sehr unterschiedlicher Festigkeit. Dolomitisierung ist vergleichsweise sehr selten.

Innerhalb der Kelheimer Kalke lassen sich einige Typen herausstellen, die aber in den Ablagerungen keine bestimmte Lage oder Anordnung einhalten, sich miteinander vermischen können und durch zahllose Übergänge miteinander verbunden sind (Anm. des Verf.: Diese Feststellung ist so nicht mehr haltbar, wie z. B. aus dem nachfolgend beschriebenen Profil im Steinbruch Teich belegt werden kann).

### 1. Grobdetrituskalk

Diese sehr häufige Varietät besteht aus einem regellosen Gemenge dichter, zum Teil detritärer, zum Teil chemisch gefällter Kalkkomponenten, zwischen denen große Mengen manchmal sehr gut erhaltener Fossilien verstreut sind. Die detritierten Komponenten sind MK, gelegentlich Schwammkalk, Korallenkalk, einst zermahlener Detritus von MK in groben Stücken zwischen Organismen oder schließlich aufgearbeitete Trümmer von feinstkörnigem Absatzkalk. Zwischen den Riffschuttmassen und den Fossilien bleiben stets mehr oder weniger große Lücken offen. Das Gestein bietet innerhalb der Kelheimer Fazies die meisten und besterhaltenen Fossilien. *Diceras*-Arten sind nicht selten.

Die Farbe ist gewöhnlich weißgrau, grau, braunstichig.

### 2. Breisteine

Das wichtigste Gestein der Kelheimer Fazies besteht aus kleinen (1–2 mm großen), umkrusteten detritären Komponenten, Ooiden, winzigem Schalenerreißel, kleinen Fossilien (Kalkalgen, Foraminiferen, häufig Echinodermenrelikten, Koralleneinzelkelchen, u. a. m.) und größeren, maximal hühnereigroßen, zumeist algenumkrusteten Knollen (Anm. des Verf.: Es handelt sich um Onkoide), deren Inhalt dieselbe Zusammensetzung wie die Kleinkomponenten aufweist.

Die Masse der Partikel ist mit freiem Auge zu erkennen. Breisteine sind zumeist grob sortiert und mehr oder weniger deutlich in groben Bänken geschichtet. Die Farbe ist infolge Einfärbungen durch Eisenlösungen gewöhnlich sattgelb, rötlich oder bräunlich. Das Innere von Knollen ist grauweiß.

### 3. Mörtelkalk

Extrem feinkörniger Breistein bildet die Grundmasse der fossil- und kiesellagenreichen kreidigen, weißen Kalke. Mörtelkalke pflegen dickbankige Einlagerungen in der Plattenkalkfazies zu stellen. Sie markieren tiefere Bereiche der Schüsselfüllungen (Anm. des Verf.: es handelt sich um größere Schuttlagen in die Plattenkalke).

### 4. Fossildetrituskalke

Besonders innerhalb randlicher Plattenkalkfazies eingelagert finden sich Lagen, Bänke oder linsenförmige Körper eines Kalkes, der zu rund 80 % aus Fossilzerreißel besteht. Es können dabei Schalenschillkalke entstehen (Allinger Schüssel), es können auch Echinodermenbruchstücke oder Algenkalkknötchen überwiegen (beide häufig in der Paintner Schüssel). Sind die Fossildetrituskalke lagig zwischen weißen Splitterkalken eingeschichtet, dann sind die Fossilien weniger zerstört (Anm. des Verf.: Durch die Einbettung in dichten Kalk mit geringer Durchlässigkeit wird die diagenetische Umwandlung verlangsamt). Diese Ausbildung liefert die fossilreichsten KKe überhaupt (z. B. im Weltenburger Holz).

Flache Partikel liegen nach Art der Schillkalke schichtparallel. Damit unterscheidet sich diese Ausbildung sehr vom Breistein, in dem alles unregelmäßig durcheinandergemengt ist. Schalenteile und Stacheln von Echinodermenrelikten (*Cidaris*) sind auf jeder angewitterten Fläche zu finden. Gelegentlich tauchen Fladen von *Chaetetes*-artigen Organismen auf.

#### 5. Lückenkalke

Die Absatzkalkkomponenten überwiegen über den Fossilgehalt, die Fossilien sind jedoch bereits im Handstückformat vorhanden, von gewöhnlich guter Erhaltung und hauptsächlich Zweischaler und Korallen. Charakteristisch sind daneben die vielen und teilweise beachtlich großen offenen Lücken sowie die meist deutliche Absonderung im 6–15 cm-Bereich (aber auch in Dickbänke). Örtlich gehen die Lückenkalke in Plattenkalke über.

#### 6. Korallen-Brachiopoden-Kalk

Es handelt sich um nesterförmige Einlagerungen in den übrigen Gesteinsausbildungen mit teilweise m<sup>3</sup>-großen Stöcken von Korallenbauten oder Nestern von Brachiopoden in oft vorzüglicher Erhaltung (gewöhnlich *Rhynchonella astieriana* und *Terebratula insignis*). Die idealsten Vorkommen liegen im Stbr. der Kalkwerke Saal, knapp außerhalb des Kartenblattes. Diese Entwicklung repräsentiert Relikte primärer zoogener Riffe. Riffkalke, die der ursprünglichen Unterlage aufsitzen, wurden auf dem Blattgebiet nicht beobachtet. Die Farbe ist gewöhnlich gelbweiß.

#### 7. Crinoidenkalke

Die gelblichen, mehlig-weichen Crinoidenkalke weisen eine oft an Mörtelkalke erinnernde Grundmasse auf, in der ungemein häufig Crinoidenrelikte verteilt sind. Daneben tritt Schalenzerreißel, Ooide, Pseudooide und gut erhaltene Zweischaler auf, es handelt sich um dickbankig-klotzig absondernde, sehr typische Gesteine, die gelegentlich auftreten.

#### 8. Weiße Splitterkalke

Dabei handelt es sich um reinweiße, spröde-splittrige, harte lückenfreie Kalke mit großer Ähnlichkeit zu Kalken der Massenfazies. Der Unterschied ist jedoch leicht anhand der meist reichlichen, sehr gut erhaltenen Fossilien (hauptsächlich Brachiopoden und Korallen), an nesterförmigen Einschaltungen von Breisteinen und Detrituskalken sowie an der bankigen Absonderung vorzunehmen. Es treten auch noch sprödere Kalke der Übergänge in die MK-Fazies auf.

Abwandlungen der beschriebenen Gesteinsarten resultieren aus Veränderungen in den Korngrößen der verschiedenen Komponenten, in den Lücken, in den Beeinflussungen und Veränderungen während der Diagenese.

Kehlheimer Kalk war stets ein geschätzter Werk- und Bildhauerstein. „Die lückige, wenig dichte Beschaffenheit und die verhältnismäßig geringe Härte, besonders im bruchfeuchten Zustand, erleichtern die Bearbeitung. An der Luft erhärtet er durch Austrocknen. Beim Schlagen splittert er nicht spröde (mit Ausnahme der Weißen Splitterkalke) sondern lässt sich mild bearbeiten.

Da er dickbankig oder massig ist, ist die Gewinnung von größeren Blöcken nicht schwierig. Er ist daher wie geschaffen für Großbauten und Bildhauerwerke. Lagenweise wird der Kalk oolithisch und dicht und zugleich weicher. Diese Lagen eignen sich besonders gut für Bildhauerarbeiten (BOGL 1936, S. 101).

Kehlheimer Kalke sind in mehreren Steinbrüchen erschlossen. Jedoch wird der Stein längst nicht mehr in dem Maße abgebaut wie im vorigen Jahrhundert. Die einzigen in dauerndem Abbau befindlichen Steinbrüche des Blattes Kehlheim sind gegenwärtig

1. der über 100 Jahre alte Steinbruch der Firma TEICH nördlich der Altmühl, genau am Kartenrand (weiterer Abbau findet auf Blatt Riedenburg statt).
2. der Steinbruch POLL im unteren Ziegelstal, östlich der Straße.

Die wesentlichen Anhaltspunkte zur stratigraphischen Stellung der KK ergeben sich in der Verzahnung mit der PK-Fazies. Einlagerungen von KK finden sich in teilweise großen Mengen

in den Tiefen Ulmensis-Schichten der Paintener-Kelheimer- und Allinger Schüssel. Sie sind deshalb dem Malm-Zeta 1a gleichzustellen.

Viele Bauwerke des Blattgebietes sind aus Kelheimer Kalken errichtet. Die Befreiungshalle besteht zum großen Teil aus Steinen, die im Steinbruch Ihrlersstein gebrochen wurden. Ein anderer Teil stammt aus den Brüchen am nördlichen Altmühlhang, weitere kommen aus dem Bruch ne. Grinsdorf. Die 54 kannelierten, 5,2 m hohen Säulen (75 cm Durchmesser) der Galerie wurden in einer Lage des Ihrlerssteiner Bruches gebrochen. Der neben dem Eingang ergänzte Kandelaber und weiteres Ersatzmaterial, sofern in Breistein, stamme aus dem Steinbruch POLL im unteren Ziegelstal.

Bauwerke in Regensburg, darunter Partien der Steinernen Brücke bestehen aus Kapfelberger Material. Die Steine der Porta Praetoria in Regensburg stammen nach Hasselmann (1888) aus den Brüchen bei Alkofen.

Aus Kelheimer Kalken bestehen die Walhalla, in München Siegestor, Feldherrnhalle, Ludwigsbrücke, Propyläen, in Wien das Opernhaus, Teile des Stephansdomes, in Passau Teile des Domes. Steine aus dem Steinbruch TEICH wurden für Ausbesserungen am Kölner Dom und für das Münchener Rathaus verwendet.

### Anhang 5: Steinbruch Kapfelberg

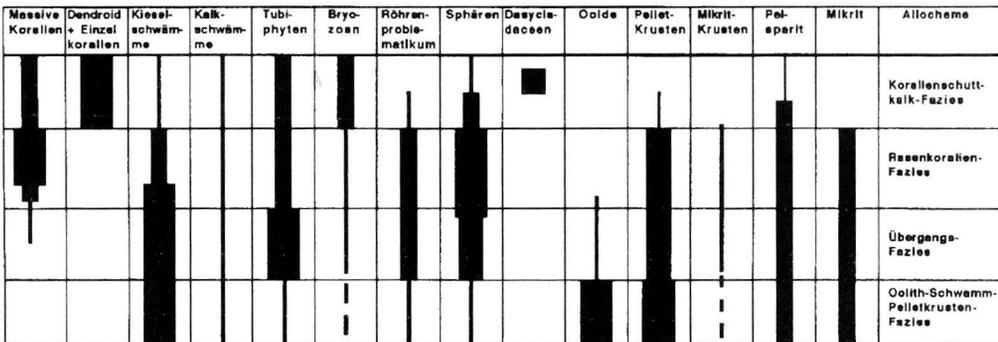
5.1 Mikrofazies, Fauna und Flora der allodapischen Kalke des Tithon im Steinbruch Kapfelberg nahe Kelheim. Angegeben sind halbquantitativ die Anteile von Mikrit, Sparit, Pellets und Onkoiden, Ooiden, Foraminiferen, Korallen und Hydrozoen, Bivalven (Lamellibranchiaten und Brachiopoden), Gastropoden, Serpuliden, Echinodermen, Codiaceen (Filzalgeln), Solenoporaecen (Rotalgen), Salpingoporella (Dasycladaceen; Grünalgen), Clypeina, vielzellige kleinen problematischen Organismen und Bacinella (aus Flügel 1975).

Schicht	Mikrit	Sparit	Ablögene		Fauna						Flora						
			Pellets, Onkoide	Ooide	Foramin.	Kor., Hydro.	Bl-valv.	Gastropoden	Serpuliden	Echinodermen	Gayeria	Solenopora	Salpingoporella	Clypeina	Organ. multi-zell.	Bacinella	
35a		X	X		X			X				X	X				
31		X	X		X			X	X	X			X	XX			
30		X	X		X			X	X				X	X			X
29	X	X	X		XX				X	X			X				
28		X	XX		X			X	X	X			XX	XX			
27	X							X									
26	X				X			X									
25	X			X				XX	X			X				X	
24	X				X			X									
23c	X	X	X	X	X			XX				X	X			X	
23a	X							XX	X							XX	
22	X	X	X		X	X		X	X			X	X	X		X	X
21		X	X		X			X	X			XX	X				
20	X	X	X	X	X			X	X	X		X	XX	X			
19	X	X	X	X	X			X		XX	X	XX					
18		X		X						X		XX					
17		X	X		X			X				XX					
16b	X												X				
16		X	X					X			X	XX					
15		X	X					X	X		X	X					
14		X	X	X			X				X	X	X		X		
13		X	X	X			X	X	X		X	XX	X				
12		X	X	X			X	X	X		X	XX			X		
11		X	X	X	X			X	X		X	XX					
10		X	X	X				X				X					
9		X	XX		X			X	X		X	XX	X				
8		X	X	X	X			X				XX					
7		X	X	X	X			X				XX					
6		X	X	X	X			X	X			XX					
5		X	X					X	X	X		XX	X				
4		X	X									XX					
3		X	X									XX		X	X	X	X
2		X	X	X			X					XX		X	X	X	X
1		X	X		X												

5.2 Mikrofazies, Fauna und Flora des fleckenhaften Riffes (Patch Reef) des Tithon im Steinbruch Kapfelberg nahe Kelheim.

Schicht	Fauna										Flora					
	Mikrit	Sparit	Abiogene		Fauna					Flora						
			Pellets, Onkoide	Ooide	Foramin.	Kor., Hydro.	Bi-valv.	Gastro-poden	Serpuliden	Echinodermen	Cayeuxia	Lithocodium	Solenopora	Salpingoporella	Clypeina	Bacnella
35B	X		X		X	X	X			X	X		X			
35d	X		X		X	X	X			X	X			X		
33	X				X	X		X	X	X		X				
33a	X		X		X	XX	X	X	X	X		X	X			X
33b	X		X		X		X		X		X	X		X		
33c	X						X			X						
32	X	X	X	X	X		X		X		X	X	X	X		
32u	X		X	X	X		X		X		X	X			X	X

Anhang 6: Verteilung der biogenen und abiogenen Komponenten und des Matrixanteils in den Faziestypen des Teichbruches (aus Flügel 1995, pers. Dokumentation).



Anhang 7: Die Verteilung der Mikrofaziestypen einschließlich der in den Fototafeln dokumentierten Proben (Probe = Fettdruck; Tafelangabe)

Mikrofaziestyp	unten	Mitte	oben
Grober Biolithit mit radiaxial-fibrösen Zementen	-	12	39 (Taf. 5/4)
Grainstone mit Lithoklasten und coated grains (mikritisiert)	-	11(Taf. 5/2), 13, 20, 52, 17, 58, 24, 34, 36, 33, 14, 62, 63, 65	39, 40, 41, 44, 50, 60 (Taf. 5/3)
Packstone-Grainstone mit Echinodermen mit syntaxialen Zementen	14, 27, 29, 31, 32, 35	37, 54, 55, 61, 64 (Taf. 15/1), 66	38, 51
Pack-Wackestone; porös mit granularen, blockigen Zementen	-	-	9, 18, 19, 21, 59, 64
Wacke-Packstone mit viel peloidaler Matrix; Fossilschutt	28	-	10 (Taf. 4/4), 22, 42, 43, 46 (Taf. 4/3), 47
Mudstone-Wacke-stone; mikritischer Biolithit (Mikroben)	26 (Taf. 4/1) 30 (Taf. 4/2), 35	-	44, 45

Anhang 8: Die Verteilung der Faziestypen mit Matrixgehalten, biogenen und abiogenen Komponenten in den untersuchten Proben an der Porta Praetoria. Die Anordnung der Proben entspricht den übereinander befindlichen Lagen

Probe	Mikrit Matrix	Pel-spar Matrix	Sparit Ze-ment	Of-fene Po-ren	Mi-kro-ben	Sch-wäm-me	Spic-ules	Pel-lo-ide	Oo-ide	Li-tho-klas-ten	Cal-ci-sphä-ren	Hy-dro-?	Mo-lus-ken fein	On-ko-ide	Mo-lus-ken grob	Echi-nod. fein	Coated grain
50	-	x	xxx	xxx	-	-	-	xx	x	xx	-	-	x	xx	-	x	xxx
22	-	-	xxxx	xx	-	-	-	xx	xxx	xxx	-	-	x	xxx	x	x	xxxx
11	-	-	xxxx	xx	-	-	-	-	x	x	-	-	x	xxx	-	x	xxxx
61	x	xx	xxx	xxx	-	-	-	xx	x	xxx	-	-	xx	-	xx	xx	xxx
14	x	x	xxx	xxx	-	-	-	x	-	xx	-	-	xx	xx	xx	x	xxx
55	xx	xx	x	xxx	-	-	-	x	-	x	-	-	x	-	xxx	-	-
60	xx	xx	xx	xxx	-	-	-	x	-	xx	-	-	xx	x	x	x	x
48	x	xx	xxx	xxx	-	-	-	x	-	xx	x	-	x	-	xx	xx	x
51	-	x	xxx	xxx	-	-	-	x	-	xx	-	-	x	-	xx	x	x
59	xx	x	xxx	xxx	-	-	-	x	-	xx	-	-	xxx	-	x	-	-
19	-	x	xxx	xxxx	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	xxxx	xx	xx
9	x	xx	xxx	xxx	-	-	-	xx	-	x	-	-	x	x	xxx	x	xx
53	xx	xxx	xx	xx	-	-	-	x	-	x	-	-	xxx	-	x	x	-
46	xx	xxx	xx	xx	-	-	-	x	-	x	-	-	x	-	-	x	-
43	xx	xx	x	x	-	-	-	xx	-	xx	-	-	x	-	-	-	-
42	xx	xxx	xx	xxx	-	-	-	xxx	-	xxx	-	-	xx	x	xxx	x	-
44	xxx	x	x	xx	-	-	-	x	-	xx	x	-	-	-	-	-	-
18	xx	xxx	xx	xxx	-	-	x	xx	-	-	x	-	x	-	-	x	-
10	x	x	xxx	xxx	-	x	-	xx	-	x	-	xx	xx	-	xx	x	-
45	xxx	xx	x	x	-	x	-	xx	-	xx	x	-	x	-	xx	-	-
28	x	xxx	xx	xxx	-	-	-	xxx	-	xx	x	-	xxx	-	xxx	x	-
35	-	xxxx	x	x	x	-	-	xxxx	-	xxx	xx	-	xxx	x	-	-	-
30	-	xxx	x	x	x	xxxx	xxx	xxxx	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	x	xxxx	x	x	xxxx	xx	-	xxxx	-	xx	-	-	-	-	-	-	-

	Grainstone mit Onkoiden und Coated grains
	Packstone - Grainstone mit Echinodermen, viele große Mollusken, und Coated grains; viele offene Poren
	Wackestone -Packstone mit Matrixpartien und Echinodermen und Mollusken, kleine coated grains (:::: gepunktet)
	Wackestones, mikritische und pelloide Matrix, Pelloide, Lithoklasten, kleine und große Molluskenbruchstücke (Mikrit /////)
	Dichter Mikrit mit Mikrobenmatten und Schwämmen und sehr vielen feine Peloiden

## Teil C: Begleitende Untersuchungen am Objekt

### 1 Das Materialinventar der Außenfassaden der porta praetoria

Zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme in den Jahren 2000–2002 wurde an den Außenfassaden der porta praetoria eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien vorgefunden, in denen sich die Bau-, Nutzungs- und Restaurierungsgeschichte widerspiegelt. Eine der ersten Untersuchungsaufgaben war es, die vorhandenen Baustoffe zu differenzieren und sie, soweit es möglich war, zu charakterisieren. Dabei kam der detaillierten Erfassung des Kalksteinbestandes aufgrund der historischen und konservatorischen Aufgabenstellung des Forschungsprojektes eine besondere Funktion zu. Eine weitere wichtige Materialgruppe bildeten die Putz- und Fugmörtel, die allein schon wegen ihrer Menge und Verschiedenheit zu untersuchen waren. Kalk- und Zementmörtel prägen das heutige Erscheinungsbild der römischen Portalanlage. Andere Materialien sind nur in untergeordnetem Maße vorhanden.

Methodisch wurde das Materialinventar durch eine Untersuchung der Oberflächen mit dem Auge und einfachen Lupen erstellt. Unterscheidungsmerkmale waren die Oberflächentopografie, Form und Farbe sowie die Zusammensetzung und Verarbeitungsart der Werkstoffe. Einbezogen wurden einfache Prüfmethode zur Feststellung einiger wichtiger physikalischer Eigenschaften wie der mechanischen Härte (Abklopfen, Bruchversuch), der Wasseraufnahme (Karstenmethode) und der Korrosionstiefe (Bohrhärteprüfung)<sup>1</sup>. Im Anschluss an die Stein für Stein vorgenommene Untersuchung wurden die identifizierten Materialien in Gruppen eingeteilt und als gemeinsame Layer kartographisch dokumentiert. Die themenbezogenen Karten sind im Anhang zu diesem Kapitel enthalten. Sie basieren auf den von Thomas Aumüller erarbeiteten und dem Projekt zur Verfügung gestellten Planunterlagen, die einen ausgezeichneten Grundstock für die kartographische Dokumentation bilden.

Während sich die Differenzierung bauzeitlicher Kalksteine von späteren Austausch- oder Reparaturmaterialien (Ziegel oder Sandstein) einfach gestaltete, bereitete die Abgrenzung der Mörtelschlämmen und Überputzungen von roh bossierten Steinoberflächen erhebliche Schwierigkeiten. Mit ähnlichen Problemen war auch die Ansprache der zeitlich unterschiedlichen Ausbesserungen des Fugennetzes des an sich unverfugten Quadermauerwerks verbunden. In beiden Fällen wurde die Charakterisierung der Werkstoffe durch die enorme Verschmutzung der Oberfläche erschwert, die sich unabhängig vom Untergrund flächendeckend ausbreiten konnte (Abb. 47). Die Konsistenz des schwarzen Belages reicht von dünnen Schmutzfilmen über mürbe und korrodierte Putze bis hin zu dick aufgewachsenen Gipskrusten. Teilweise gründet die schwarze Schicht auf einem dunkelgrauen Anstrich, der einer der Restaurierungen in den 1950er Jahren zuzurechnen ist (Retusche). In jedem Fall

<sup>1</sup> Die Bohrhärteprüfung wurde von Mitarbeitern des Zentrallabors des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege durchgeführt.

behinderte das alles überziehende Schwarz die Ansprache des Materialbestandes, der nur indirekt über vorhandene Beschädigungen oder Suchschnitte zu bestimmen war.

Zur Verifizierung der Befunde wurde die aus der makroskopischen Untersuchung und restauratorischen Befunderhebung bestehende Bestandsaufnahme am Objekt mit der mikroskopischen Analyse des Schichtenaufbaus im Labor kombiniert. Die Auswertung der Befunde mündete in eine erste Inventarisierung der Baumaterialien. Die Schichtenabfolgen sind in Befundblättern abgelegt und ergänzen die oberflächenorientierte kartographische Dokumentation.

Zusammenfassend lässt sich das vorläufige Materialinventar wie folgt beschreiben:

Kalksteinmauerwerk: Das Mauerwerk des noch verbliebenen Ostturmes der porta praetoria und des westlichen Torbogens besteht aus einheimischem Kalkstein, der als Malm-Kalk oder Massenkalkstein anzusprechen ist. Das Material ist in massiven Blöcken als lotrechtes Quadermauerwerk verbaut und mit regelmäßig durchlaufenden Fugen mörtellos versetzt. Mit Ausnahme der späteren Zusetzungen und kleinerer Veränderungen ist der in situ erhaltene Bestand bauzeitlich. Das Material weist eine breite Varianz hinsichtlich der verwendeten Kalksteine auf.

Methodisch erfolgte die Bestimmung der Faziestypen durch makroskopische und mikroskopische Faziesanalyse der 240 römischen Quader. Die sedimentologischen und mineralogischen Befunde sind in Teil B ausführlich beschrieben, der kartographische Befund ist im Anhang enthalten (Anhang, S. 187, Bestandsaufnahme C.1 Kalksteine, Faziestypen).

Für die Zusetzung der in das römische Mauerwerk eingebrochenen Öffnungen an der Ost- und Westseite des Ostturmes wurden ebenfalls Kalksteine verwendet, deren Herkunft aber nicht geklärt ist. Die Bearbeitungsspuren und Faziestypen verweisen jedoch auf Spolien aus römischer Zeit. Nur im Falle der Zusetzung des ehemaligen Verbindungsganges vom bischöflichen Brauhaus in das Untergeschoss des Turmes ist eine Datierung der baulichen Veränderungen möglich, da die Maßnahme zum Sudhausabbruch und der Neugestaltung der Ostfassade der porta praetoria um 1910 gehört.

Festzuhalten ist, dass sämtliche bauzeitlichen Quader aus Kalkstein gefertigt sind. Es wurde kein einziger Grünsandstein im römischen Mauerwerk gefunden, der zum originalen Bestand zu rechnen wäre. Demnach handelt es sich um reines Kalksteinquadermauerwerk.

Spart man die Rundbogenöffnungen im Obergeschoß aus und kalkuliert den Bestand an Kalksteinquadern im Hinblick auf die Gesamtfläche des halbrund vorspringenden Turmes, so summiert sich der noch erhaltene Bestand an Werksteinquadern der Bauzeit auf 75 Flächen-%, was einem Materialschwund von 25 % entspricht. Nicht mit einkalkuliert ist der Bauabschnitt oberhalb der Rundbogenfenster mit dem gegebenenfalls vorhandenen zweiten Geschoss.

Ergänzungen mit Grünsandstein: Für kleinere Reparaturen, Zusetzungen und bauliche Veränderungen wurden neben Kalksteinspolien auch carbonatische Grünsandsteine benutzt. Der Anteil an Sandsteinen im aufgehenden Mauerwerk ist gering (die größeren Stücke kann man an einer Hand abzählen) und beschränkt sich auf die Ausflickung von Schadstellen. Die Maßnahmen haben den Charakter von Reparaturen; sie folgen keinem gestalterischen Schema und haben keine denkmalpflegerische Intention (siehe auch Abb. 53).

Eine Datierung der Reparaturen ist für die Zusetzung des Segmentbogenportals realistisch (1910). Ebenso ist der verstreute Einbau kleinformatigen Sandsteinbruchs in der Ostfassade überwiegend in die Jahre nach 1910 zu datieren. Dafür sprechen die zementhaltigen Mörtelbefunde. Einzig die in Bruchstein ausgeführte Vermauerung des Durchbruchs oberhalb des Segmentbogenportals kann älter sein und ist gemäß den Befunden dem Zeitpunkt des Mauerdurchbruchs und der Erstellung des Portals zuzurechnen.<sup>2</sup>

Fasst man den Gesamtbestand an Grünsandstein zusammen, so beläuft sich der Anteil des Reparaturmaterials an der Fassade auf nicht mehr als 2 Flächen-%. (Anhang Bestandsaufnahme C. 2, S. 188, Materialinventar).

Ergänzungen mit Mauer- und Dachziegeln: Neben dem Grünsandstein finden sich Ausflickungen und Füllungen mit gebrannten Mauer- und Dachziegeln. Die Ziegel dienten dem Verschließen von Hohlstellen, der Verfüllung allzu großer Fugen und der Reparatur. Dabei sind zwei bis drei unterschiedliche Ziegelformate und Ziegelmensetzungen zu unterscheiden. Es liegen zumindest zwei niedrig gebrannte mittelalterliche Sorten und ein hochgebrannter neuzeitlicher Klinker vor. Das Gros der Füllungen ist aufgrund der Mörtel den Restaurierungen nach 1885 zuzuschreiben. Die Ansprache und Lokalisation der älteren Reparaturen ist wegen der massiven Überfugung mit Zementmörteln problematisch und kann erst nach der Abnahme der Fugmassen vorgenommen werden.

Auf die Fassade übertragen und unter Berücksichtigung der mit Zementmörteln überfugten Partien, summiert sich der Ziegelanteil ebenfalls auf maximal 2 Flächen-%, was bei einer ersten Betrachtung des Mauerwerks erstaunt, da die ziegelhaltigen Ausflickungen (ebenso wie der Sandstein) offensichtlich ins Auge fallen. Dieser Umstand ist jedoch eine Folge der andersfarbigen Oberfläche in einer ansonsten einheitlich schwarzen oder weißen Umgebung und beruht nicht auf der tatsächlich vorhandenen Menge an Reparaturmaterial (siehe Anhang C. 2, S. 188, Bestandsaufnahme: Materialinventar, andere Materialien).

Eiserne Zuganker: Hinzuweisen ist auf die Anwesenheit eiserner Klammern und verteilter Zuganker, fünf an der Zahl, die sämtlich oberhalb des faszierten Gesimses angebracht sind. Alleine vier Anker sichern die letzte erhaltene römische Steinlage. Aus den Ergebnissen der Befundsnitte, der Verarbeitungsart und dem Korrosionsgrad des Eisens sowie der Tatsache, dass die Anker auf den ältesten Aufnahmen bereits an ihrem heutigen Platz zu sehen sind, ist von einer Datierung in das 15. Jahrhundert auszugehen (siehe Anhang C. 2, S. 188, Bestandsaufnahme: Materialinventar, andere Materialien).

Putzmörtel und Fugmassen: Den größten Umfang an Fremdmaterialien, die nach der Bauzeit auf die Natursteinfassade aufgebracht wurden, nehmen Putz- und Fugmörtel ein. Dies ist auf den ersten Blick so nicht wahrzunehmen und erschließt sich erst in der kartographischen Dokumentation. Dabei sind die Mörtel nicht einmal komplett erfasst, da die Schlämmen auf den Gesteinsoberflächen ohne Reinigung nicht eindeutig als solche anzusprechen sind und nicht aufgenommen werden konnten.

<sup>2</sup> Die Anzahl, Stärke und Art der Farbschichten auf dem Sturz und die Alterung des verwendeten carbonatischen Versetzmörtels sind mit einer Standzeit von maximal 150 Jahren zu korrelieren, was einer Datierung in das 18. Jahrhundert entspräche.

Die Unterscheidung der Mörtelphasen ist aus mehreren Gründen problematisch. Zum einen ist eine gesicherte Beurteilung der Mörtelzusammensetzung in vielen Fällen nur möglich, wenn die Oberfläche durch Schädigung offen zutage liegt. Zum anderen überlagern die seit 1910 aufgetragenen Reparaturmörtel die älteren Befunde. Und zum dritten wurden während der Restaurierungsphasen nach 1910 wiederholt unterschiedliche Mörtelvarianten für Putzflächen, Fugen und Übergänge verwendet.

Nach Auswertung der Befunde und der Aktenlage kann eine erste Klassifizierung der Putz- und Fugenmörtel vorgelegt werden. Dabei wird zunächst zwischen Zementmörteln, zementhaltigen Kalkmörteln und älteren Kalkmörteln differenziert. Am einfachsten ist die Ansprache der heute verputzten Oberfläche, die einen sehr harten und dichten (Kalk-) Zementmörtel von grauer Farbe trägt, der an der Oberfläche rau abgerieben und der Restaurierung von 1958 zuzurechnen ist (Putz der Rundbogenfenster, Überputzung der Durchbrüche an der Ostfassade). Die dicke Putzschicht überlagert sowohl einen zementhaltigen Kalkmörtel, der während der Restaurierung von 1910 angetragen wurde, als auch einen Putz, welcher der Maßnahme nach 1948 zuzuschreiben ist (ebenfalls ein sehr fester Zementmörtel). Der in der Literatur beschriebenen Restaurierung von 1958 ist außerdem ein grober Kalkmörtel mit Zementzusatz und recht buntem Zuschlag zuzuordnen. Er findet sich in unterschiedlichem Erhaltungszustand an der gesamten Fassade und ist auf die Steinoberflächen ausgezogen. Der Mörtel kann den Charakter einer Schlämme haben und ist gleichzeitig in fließenden Übergängen zu den angrenzenden Putzflächen des Bischofshofs zu finden (der zitierte Sumpfkalkmörtel).

Die Befundsituation wird durch die Applikation weiterer Zementmörtel nicht gerade übersichtlicher. Beispielsweise wurde ein fetter Zementmörtel mit Kalkzuschlag zur Verfüllung von Rissen verwendet. Nach den Befunden sollte er zur Maßnahme von 1910 gehören. Daneben kommt ein weiterer harter Zementmörtel mit einem zum Teil sehr grobem Kiesel- und Kalksteinzuschlag vor, der im großen Stil als Fug- und Ausbesserungsmasse angetragen wurde und wesentlich zu dem heterogenen Bild heute beiträgt. Die Datierung ist einfach und kompliziert zugleich: Aufgrund der flächenhaften Verteilung muss der Mörtel nach 1910 aufgebracht worden sein; hinsichtlich seiner Zusammensetzung und Verarbeitung kann er jedoch den Restaurierungen um 1910, 1927 oder 1948 angehören. Nach der Bildauswertung ist sogar eine Zwischenphase wahrscheinlich, die in die 1930er Jahre zu datieren ist.

Ältere Kalkmörtel sind nicht exakt anzusprechen, was in der Überlagerung der Mörtelschichten mit dem Sumpfkalkmörtel von 1958 begründet ist. Lediglich zwei Kalkmörtel heben sich aufgrund ihrer rötlichen Farbe von den Reparaturmörteln moderner Provenienz ab. Sie sind aber nur auf der Ostfassade anzutreffen. Nicht geklärt ist die Befundlage vor den Restaurierungskampagnen in der Zeit nach 1887. Denn verlässliche Angaben über die Verteilung und Menge der mittelalterlichen Putze können erst nach der Abnahme der Schmutzschicht gegeben werden. Ungeklärt ist auch, mit welchen Materialien man eigentlich 1887 arbeitete. Denn weder die Befunde noch die Auswertung des Bildmaterials lassen Rückschlüsse auf die erste Restaurierung zu. Man könnte fast den Eindruck gewinnen, als hätte man sich mit der Freilegung begnügt und demonstrativ den Alterswert des Bauwerks zur Schau gestellt.

Summiert man den Anteil von Putzen und Fugmassen, ohne die Schlämme auf Gesteinsoberflächen zu berücksichtigen, sind annähernd 20 Flächen-% des Ost-

turmes mit Putz- und Fugmörteln bedeckt, die den Restaurierungen nach 1910 zuzurechnen sind (Anhang Bestandsaufnahme C. 3, S. 189, Putzmörtel und Fugmassen).

## 2 Putze, Mörtel und Farbfassungen

Mit der kartographischen Erfassung war eine restauratorische und naturwissenschaftliche Untersuchung am Objekt verbunden, die sich der Klärung der Schichtenabfolge der Mörtel und Farbfassungen widmete. Das methodische Vorgehen war vom Anlegen kleinformatiger Befundschnitte an der Fassade und der zerstörungsarmen mikroskopischen Analyse von Mikroproben bestimmt. Im Zuge der Arbeiten wurden eine Reihe exemplarisch ausgewählter Mörtel-, Putz- und Farbproben analysiert. In der Zusammenschau mit den Befunden am Objekt lassen sich drei bis vier mittelalterliche und nachmittelalterliche Mörtel belegen. Außerdem ergaben sich vage Hinweise auf farbliche Konzepte. Eines steht zumindest unumstößlich fest: Bis dato weist kein einzigen Befund auf die Verwendung eines bauzeitlichen Mörtels hin – weder als Versetz-, Verfüll- noch als Putzmörtel.

### *Einige Beispiele für die Putz- und Mauermörtel<sup>3</sup>*

#### Frühmittelalterliche Mörtel:

Die Geschichte der Mörtel und Putze an der porta praetoria beginnt mit einem frühmittelalterlichen Kalkmörtel. Das bindemittelreiche Material ist von intensiv gelbbrauner Farbe und zeichnet sich durch grobe Flusskieselzuschläge und Kalkspatzen aus. Ein Schlüsselbefund ist in der Zusetzung des bis 1910 vermauerten östlichen Rundbogenfensters zu finden. Hier ist der Mörtel als älteste Schicht erhalten. Er wurde auf eine gealterte, starke verschmutzte Steinoberfläche aufgetragen und enthält den Abdruck eines Rundholzes, das oberhalb des südlichen Kämpfersteins in das Rundbogenfenster hinein verlief. Das Material wird von einem weißgrauen Kalkmörtel und dem mehrere Zentimeter dicken, dreilagigen Zementmörtel der Restaurierung von 1958 überdeckt (Abb. 48).

Der Mörtel gleicht einem gelbbraunen bindemittelreichen Putz mit Flusskieselzuschlag, der ebenfalls auf einer gealterten und verschmutzten Steinoberfläche aufliegt und den Charakter einer Schlämme hat. Die Schicht ist verschmutzt und verschwärzt und findet sich in zusammenhängenden Flächen auf den Werksteinen im Bereich der Rundbogenfenster. Der Erhaltungszustand der Putzfragmente ist auf der Ostfassade recht gut, währenddessen sie auf der gegenüberliegenden Westseite stark gelitten haben. Die Schlämme bedeckt u. a. die Baunaht oberhalb der Kämpfersteine der Fenster; dort überzieht sie ein vollständig sauberes Bruchsteinmauerwerk aus Kalkstein, auf dem keine Grenze zwischen der Aufmauerung und dem Putz erkennbar ist (Abb. 49). Inwieweit der Turm überputzt war, kann nur vermutet werden; Mörtelreste auf zahlreichen Quadern sprechen aber für eine flächenhafte, mittelalterliche Putzschlämme.

Hinzuweisen ist außerdem auf die rötliche Verfärbung des Putzes auf der Ostseite, die nicht auf einem Anstrich beruht, sondern auf die thermisch induzierte Oxidation eisen- und tonmineralhaltiger Bestandteile im Kalkstein („Nichtcarbonate“) zu-

<sup>3</sup> Eine Zusammenfassung der wichtigsten Kenndaten der Mörtel ist im Anhang zu diesem Kapitel enthalten (Anhang C.6).

rückgeht. Nach Auswertung der Befunde und der geschichtlichen Daten und unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Kalkmörtel, ist der flusskieselhaltige Putz- und Mauermörtel einer frühmittelalterlichen Ausbauphase des Bischofshofs zuzurechnen, die in die Zeit vor den Stadtbrand 1273 datiert werden kann.

#### Spätmittelalterlicher Putz- und Mauermörtel:

Es folgt ein bindemittelreicher grauweißer Kalkmörtel mit Flusskieselzuschlag. Der Mörtel steht in Zusammenhang mit der Vermauerung des Rundbogenfensters auf der Ostseite, für dessen Zusetzung niedrig gebrannte Ziegel verwendet wurden. Identische Befunde sind im Anschluss des Quadermauerwerks an die Putzfassade (Ostseite) sowie in der an den Ostturm anschließenden Nordfassade zu belegen. Die Befunde an der Nordfassade liegen oberhalb eines profilierten römischen Gesimses, das abgeschlagen wurde.

Zu dem Mauermörtel gehört ein nur an einigen wenigen Stellen nachweisbarer Putz- oder Reparaturmörtel. Der wichtigste Beleg für den Mörtel ist die Einputzung der Eisenklammern und eisernen Zuganker auf der Nordwestseite des Turmes in Höhe der Schlusssteine. Die Eisen sind in eine kompakte Mörtelmatrix mit Flusskieseln eingebettet, die grauweiße und gelbbraune Schichten enthält. Beide Mörtel sind auf der Gesteinsoberfläche dünn ausgezogen und in der Umgebung der Eisen geglättet; auf einer Befundstelle können Spuren einer roten Farbe (?) erhalten sein. Heute sind die mittelalterlichen Befunde von dem Sumpfkalkmörtel der Restaurierung von 1958 überdeckt, dessen Oberfläche mit grauer Farbe retuschiert ist und nun einen flächenhaften schwarzen Belag trägt (Abb. 50).

Der markante hellgraue Putz mit Flusskieselzuschlag ist hinsichtlich seiner Zusammensetzung, der zeitlichen Korrelation mit der Ziegelausmauerung und der Verteilung am Bauwerk mit hoher Wahrscheinlichkeit der Umbaumaßnahme unter Bischof Friedrich III. von Plankenfeld im 15. Jahrhundert zuzurechnen. Ob die Eisenanker aus dem 15. Jahrhundert stammen oder bereits in einer früheren Bauphase eingesetzt worden sind, muss noch geklärt werden.

#### Barocker (?) Reparaturmörtel:

In der Umgebung der Rundbogenfenster ist an einigen wenigen Stellen ein weißer Kalkmörtel in das Fugennetz eingebracht worden. Die Antrugungen haben den Charakter einer Ausbesserung und lassen sich nur in Rissen der Mauerschale nachweisen. Der feine carbonatische Mörtel ist durch einen hohen Anteil an gut gerundetem Flusssand gekennzeichnet und enthält keine Kiesel. Nach der Zusammensetzung des qualitativ hochwertigen, aber recht weichen Materials kann es sich um eine barocke Ausbesserung handeln.

#### Innenraummörtel:

Auf der bis 1910 überbauten Ostfassade haben sich an einigen wenigen Stellen Fragmente kalkgebundener Putz- und Fugmörtel erhalten. Dabei lassen sich zwei rötlich eingefärbte Kalkmörtel belegen, die über hohe Anteile an hydraulischen Komponenten (Ziegelsplitt) verfügen und der Vermauerung von Fehlstellen im Mauerwerk dienten oder in Zentimeterstärke als Putzmörtel aufgetragen wurden. Auch in diesem Fall ist keine Zuordnung der Befunde oder zusammenhängende Rekonstruktion des geschichtlichen Werdegangs möglich, da es keine Überschneidungsbereiche mehr gibt.

Die Ursachen für die generell magere Befundsituation und das spartanische Aussehen der Ostfassade, die eigentlich über mehrere Jahrhunderte geschützt und Teil einer Innenraumkonzeptes gewesen ist, sind ohne Zweifel in der Restaurierungsgeschichte des 20. Jahrhunderts zu suchen. Diese begann mit der Restaurierung der Ostfassade 1910, setzte sich 1927 und 1948 mit der Putzimitation von Mauerwerk fort und fand ihren vorläufigen Höhepunkt in der Re-Restaurierung von 1958. Es grenzt schon an ein Wunder, dass es überhaupt noch Hinweise auf eine ältere Gestaltung gibt; aufschlussreiche Rekonstruktionen sind aber sicherlich nicht mehr zu erwarten.

#### Die Zementmörtel der Restaurierungen nach 1885:

Der nachweislich erste Reparaturmörtel nach 1885 ist ein graugrüner fetter Zement, mit dem Risse verschlossen wurden. Er wurde großzügig über Fugen gestrichen und mit dem Quast nachgewaschen. Typische Befundstellen gibt es an der südlichen Laibung des bis 1910 verbauten Rundbogenfensters, an denen auch der Verschwärzungsgrad nach dem Abriss des Sudhauses 1910 ablesbar ist. Das recht rüde Verfahren wurde (leider) an der gesamten Fassade praktiziert (Abb. 51).

Die genaue Zuordnung der als Anstrichmassen aufgetragenen Zementmörtel aus den Jahren 1910, 1927, den 1930er Jahre und 1948 kann erst nach der Reinigung erfolgen. Ohne Zweifel zu datieren sind vereinzelte Fragmente der 1948 aufgetragenen Putzschicht mit einer sehr bescheidenen Fugenritzung (Abb. 52) und die jüngste Restaurierung von 1958, bei der einerseits ein sehr harter Zementmörtel, andererseits ein sehr weicher Sumpfkalkmörtel verwendet wurde.

#### *Farbfassungen*

Das Gros der Fassungsbeefunde konzentriert sich auf die durch das Sudhaus bis 1910 überbauten Bereichen. Dabei ist der in die freistehende Sudhauswand übergehende Wandabschnitt des Ostturmes von der Oberfläche der Ostfassade zu unterscheiden, die bis 1910 als westliche Innenwand des Sudhauses fungierte.

Die Farbgebung der Innenräume ist – wenn überhaupt vorhanden – unübersichtlich und von der Raumnutzung bestimmt. Analog zu den Putzen, existieren aufgrund der Veränderungen nur sehr wenige aussagekräftige Befunde. Eindeutig als Anstriche können nur die Tünchen auf dem Segmentbogen des Durchgangs in das Kellergeschoss des Ostturmes angesprochen werden. Sie befinden sich ausschließlich auf der Seite des Sudhauses und sind grob in den Zeitraum vor die Inbetriebnahme eines Kamins und danach zu datieren. Der Kaminzug ist an der Außenseite des Ostturms an der Vertiefung im Mauerwerk und der eingemauerten Konsolsteine erkennbar. Er verlief über das südlichste Rundbogenfenster hinweg. Auf den gipshaltigen und vergilbten Tünchenschichten (zwölf an der Zahl) liegen alternierend fünf holzkohle- und schmutzhaltige Layer sowie fünf Weiß- oder Rotfassungen, die einen Einblick in die Nutzung des Durchgangs erlauben, dessen Rahmung offensichtlich in regelmäßigen Abständen gestrichen wurde (Abb. 53).

Auf einzelnen Quadern des in die Sudhausmauer übergehenden Turmabschnittes, die nach dem Abriss der Ziegelmauer 1910 freigelegt wurden, lassen sich Reste von zwei bis drei zeitlich unterschiedlichen Fassungen nachweisen. Die älteste Fassung ist eine mit rotem und gelbem Ocker pigmentierte Kalktünche, die in Zusammenhang mit der ersten Putzschlamme steht. Es folgen zwei bis drei kräftige, Bleiweiß und Öl enthaltende Weißfassungen, die mit Calciumcarbonat ausgemischt sind und

deutliche Schwundrisse zeigen. Sie werden von einer dünnen aber farbintensiven Rot- bzw. Ockerfassung überdeckt. In den Schwundrissen der Schicht und an deren Unterseite haben sich Mikroben angesiedelt (Hyphomyceten; Schwärzepilze), was auf eine ausgesprochen nährstoffreiche Umgebung hinweist. Vereinzelt finden sich immer wieder Farbinseln der kalk- und ölhaltigen Überfassungen, die an einigen Stellen weiß, an anderer Stelle rot pigmentiert sind. Leider stehen die Befunde eher isoliert, so dass man sie ohne Reinigung in keinen Gesamtzusammenhang stellen kann (Weißfassung, Rot-Ockerfassung ? Abb. 54). Würden sie nicht in Bereichen liegen, die lange Jahre geschützt waren (Anbau der Sudhausmauer), wären sie nur von geringem Interesse. Da sie sich jedoch in der oberen Etage befinden, dort die mittelalterliche Putzschlämme bedecken und in kein erkennbares Raumkonzept eingebunden waren, verdienen sie während der künftigen Restaurierungen besondere Aufmerksamkeit: Es könnte sich um die letzten Befunde der mittelalterlichen und nachmittelalterlichen Anstriche handeln.

Ein farbiger Einzelbefund ist an der Nordwestseite des Turmes in Augenhöhe erhalten. Die aus zwei horizontal übereinander liegenden Balken bestehende, beige Ölfarbmarkierung wurde auf eine verschwärzte Kruste aufgemalt und ist wiederum von einer schwarzen Kruste überlagert. Gemäß der Auswertung der Archivunterlagen der Anstrich gehört sie in die Zeit vor 1945 und ist im weitesten Sinne der „Nutzungsgeschichte“ des Bauwerks zuzuschreiben (Hinweis auf einen Luftschutzraum o. ä.).

### *Verfärbungen*

Zwei farbige Erscheinungen müssen noch erwähnt werden. An mehreren Fassadenabschnitten sind auffallend rote Flecken und Spuren anzutreffen, die nicht mit Farbanstrichen zu korrelieren sind. Es handelt sich zweifelsfrei um eine irreversible Veränderung des Kalksteins, bei der gelbbraune Komponenten in tiefrote umgewandelt wurden, in denen ausschließlich oxidierte Eisenverbindungen nachweisbar sind (Hämatit). Der Grund liegt in der thermisch induzierten Umwandlung eisenhaltiger Tonverbindungen in Eisenoxide, was nur durch äußere Brandeinwirkung erklärt werden kann. Die Brandspuren sind in den Laibungen der westlichen Rundbogenfenster besonders stark ausgeprägt (Brandherd im Innenraum). Ebenso lassen sie sich in den mittleren Lagen der Ostfassade, im Umfeld des ehemaligen östlichen Tors sowie auf der Werksteinrahmung des noch erhaltenen westlichen Tors nachweisen (Brandherd an der Außenfassade und im Torbereich). Der ruinöse Zustand, das chaotische Rissbild und das Fehlen jeglicher Farbschichten mit Bindemittelzusatz sind deutliche Indizien für ein brandgeschädigtes Kalksteingefüge, das nichts mit einer Farbfassung gemein hat (Abb. 55).

Zum Anderen liegen auf dem Kalkstein unterhalb der Schmutzschichten gelbliche bis braune Beläge, in denen sich ebenfalls keine Farbanstriche nachweisen lassen. Vielmehr hat man es mit natürlichen, über einen langen Zeitraum gebildeten Alterungsschichten zu tun, die im weitesten Sinn mit dem Begriff der Patina oder der oft genannten „Wetterkrusten“ zu umschreiben sind und chemisch gesehen aus Calciumcarbonat, Gips und Calciumoxalat bestehen. Aus der Literatur ist das Phänomen bekannt, dass bei der Beteiligung von Oxalaten Kalksteinoberflächen häufig eine gelblich-braune Farbe annehmen<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Siehe M. Realini, L. Toniolo (Ed.) „The oxalate films in the conservation of works of art.“ II. International Symposium, Conference Proceedings. Mailand 1996.

### 3 Anmerkungen zum Zustand der porta praetoria

#### *Die kartographische Schadensaufnahme<sup>5</sup>*

Auf der Grundlage der an der porta praetoria vorliegenden Problematik wurde ein Kriterienkatalog typischer Schadensphänomene aufgestellt, die Stein für Stein in Form einer kartographischen Dokumentation verzeichnet wurden. Die Ergebnisse liegen in zwei Kartierungen vor, wobei eine Kartierung die Lokalisation der Verwitterungsphänomene und die Verteilung der Krustenbildung zum Thema hat, während sich die zweite auf die Ansprache von Hohlstellen und Rissen innerhalb der Kalksteine konzentriert (siehe Anhang C. 4, 5, S. 190 u. 191, Bestandsaufnahme Schadensphänomene I, II).

An Kartierungskriterien wurden folgende Schwerpunkte gewählt:

1. **Biogener Aufwuchs:** Algenbeläge und geringer Flechtenbewuchs lassen sich im bodennahen Bereich und an der Abtreppung der Ostseite nachweisen. Der Angriff der Gesteinsoberfläche ist gering; es finden sich keine besonderen Anzeichen für eine biogen induzierte Bildung von Mikrokarst.
2. **Verwitterungsphänomene:** Unter der Kategorie *Verwitterung* wurden sämtliche Phänomene erfasst, die einen mehr oder minder großen Substanzverlust der originalen Oberfläche bedeuten. Dazu gehören einige singuläre Schadensbildern:
  - 2.1 **Rückwitterung:** Mit *Rückwitterung* wird das Auswittern einzelner Komponenten beschrieben. Dies betrifft insbesondere die Kalksteinfazies C–E und den bröckeligen Zerfall thermisch veränderter Steine. In beiden Fällen ist die originale Oberfläche nicht mehr erhalten; in diesen Bereichen konnten sich keine Krusten bilden oder diese sind, falls sie vorhanden waren, wieder abgefallen. Bei Quadern mit thermischer Vorschädigung ist die Rückwitterung bis in eine Tiefe von 20 bis 40 mm fortgeschritten.
  - 2.2 **Schalenbildung:** Unter *Schale* werden Bereiche des Kalksteins verstanden, die sich vollständig vom Kernmaterial abgelöst haben und anhand eines Hohlraumes optisch oder akustisch nachzuweisen sind. Über die Größe und Beschaffenheit der Trennflächen können keine Angaben gemacht werden. Die Schalen erreichen eine beträchtliche Größe. Bemerkenswert ist, dass der Rissverlauf von der Vorderseite des Steins bogenförmig zu einer der Seitenflächen verläuft. Beim Abfallen der Schale droht der vollständige Substanzverlust. Risse dieser Art können auf Brandeinwirkung, statische Überbeanspruchung oder auf ein im Gestein angelegtes Kluftgefüge zurückgehen.
  - 2.3 **Auflagern:** *Auflagern* beschreibt das schichtenparallele Aufschiefern der Gesteinssubstanz und betrifft ausschließlich die an der Fassade vorkommenden Sandsteine.
  - 2.4 **Absanden:** *Absanden* ist ebenfalls auf Sandsteine beschränkt. Es ist dem Rückwittern vergleichbar. Durch Bindemittelverlust oder Frost-Tauwechsel werden Kornbindungen gelockert und der Kornverband sukzessive aufgelöst
3. **Krustenbildung:** Bei den *Krusten* werden dünne von dicken Krusten unterschieden. Die dünnen Krusten zeichnen das Gesteinsrelief nach. Im Gegensatz dazu bilden die dicken Krusten eine eigene Morphologie aus. Bei beiden Arten

<sup>5</sup> Die kartographische Schadensaufnahme orientiert sich an der VDI-Richtlinie 3798, Blatt 1–3.

ist die dunkle Farbe auf die Einlagerung von Schmutz- und Rußpartikel zurückzuführen. Die dunklen Partikel liegen in einer Matrix aus sekundär gebildetem Gips. Krusten sind fast am ganzen Gebäude anzutreffen. Dabei fällt auf, dass an regengeschützten Bereichen verstärkt dicke Krusten anzutreffen sind. Im Westen – an der Hauptwetterseite – findet sich ein zusammenhängender Bereich, an dem sich aufgrund des ablaufenden Regenwassers keine Krusten gebildet haben.

4. Risse: Risse treten innerhalb von Kalksteinquadern (Abb. 56) sowie innerhalb und entlang von Fugmörteln auf (Flankenabriss, hohl oder lose liegende Fugmassen). Die Risse im Kalkstein stehen meist in Zusammenhang mit Hohlstellen bzw. Schalen. Statisch bedingte Risse verlaufen über mehrere Steinlagen hinweg. Sie sind meist älteren Datums, was an der intakten Verfüguung abgelesen werden kann. An der Nordseite des Ostturmes sind Flankenabriss im Fugennetz zu erkennen, die auf aktive Bewegungen im Bauwerk hindeuten.
5. Effloreszenzen: Das Auftreten von *Salzausblühungen* ist vom Mikroklima sowie Feuchte- und Temperaturwechseln abhängig. Zum Zeitpunkt der Aufnahme waren Effloreszenzen insbesondere in der Sockelzone der westlichen Mauerabschnitte und im Innenraum („Kartoffelkeller“) zu beobachten.
6. Calcinierung: Dieses Phänomen, das den gelblich-weißen Kalkstein rötlich erscheinen lässt, wird durch thermische Umwandlung des Gefüges hervorgerufen. Dabei werden gelbliche, wasserhaltige Eisenverbindungen in roten Hämatit umgewandelt, was zu einer blassrosa bis tiefroten Farbe des Gesteins führt. Durch den Brand wird das Gefüge des Kalksteins gestört und einer beschleunigten Rückwitterung Vorschub geleistet (thermische Vorschädigung). Die Rückwitterung geht mit einer sehr feinen Schalenbildung und einem deutlichem Abschuppen der feinen Schalen einher (Abb. 57).
7. Taubenkot: Schmutzfahnen, Salzausblühungen und Taubenkot sind bevorzugt in den oberen Bauwerksabschnitten und unterhalb von Nischen mit Taubenestern anzutreffen. Der schädigende Einfluss und der Eintrag von Schadstoffen wird durch die Krusten auf dem Kalkstein gemindert.
8. Verkarstung: Mit Verkarstung wird die von den gesteinsbildenden Komponenten unabhängige Auflösung des Gesteins beschrieben. Durch Lösungsvorgänge entstehen größere Poren und der Stein nimmt ein tuffähnliches Erscheinungsbild an. Verkarstungsphänomene sind auf die Quader in der Sockelzone beschränkt.
9. Schmutzfahnen: Weißgraue Schmutzfahnen auf den schwarzen Krusten sind auf Probleme in der Wasserführung und Lösungsprozesse zurückzuführen. Es handelt sich um ein Schadensbild neueren Datums.

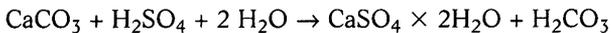
### *Beläge und Krusten*

Fasst man die Ergebnisse der kartographischen Beschreibung zusammen und bezieht die Laboranalysen mit ein, ist die Formierung von Belägen und Krusten eines der zentralen Schadensphänomene an der porta praetoria. Zum Zeitpunkt der Zustandserfassung waren etwa 80 % des Mauerwerks von einem schwarzen Belag überzogen.

Der Belag datiert in die Zeit nach 1885. Dies wird besonders deutlich an den bis 1910 vermauerten Fassadenabschnitten der Ostfassade, die während der sich anschließenden Restaurierungskampagnen mit Zementmörteln ausgebessert worden sind und heute einen gipsgestützten schwarzen Belag tragen. Berücksichtigt man die Reinigung von 1958 und die während dieser Zeit ausgeführten Antragungen mit Sumpfkalkmörtel, ist davon auszugehen, dass das Gros der Beläge und Krusten nach 1910 und nach 1958 entstanden ist. Demnach ist die das Gebäude prägende schwarze Schicht insgesamt nicht älter als 90 Jahre.

Mit Ausnahme beregneter Abschnitte auf der Westseite sind nahezu alle Oberflächen des Ostturms von dem schwarzen Belag betroffen. Die Krustendicke schwankt systematisch: So sind die Dicken in den Übergangsbereichen von der beregneten Westseite zur Regenschattzone im Nordwesten maximal, während der Belag an der Ostseite unmerklich in dünne Krusten und zähe Schmutzaufgaben übergeht. Bestimmt man bei einem Turmrundgang die Krustendicke, so beträgt sie 0 mm im Westen (saubere Oberfläche), 5 mm an der Nordwestseite (Zäpfchensinter in den Regenschattzonen) und 0,2 bis 1 mm auf der Nord- und Ostseite. Dabei ist die Nordseite von Krusten der verschiedensten Formen betroffen.

Die Beobachtung der Krustenformierung steht im Einklang mit der Theorie, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den Umweltbedingungen („Saurer Regen“), der Krustendicke und der Wassermenge bzw. der Verdunstungsrate besteht. Generell gilt: Je saurer die Umweltbedingungen, je mehr Feuchtigkeit vorhanden ist und je länger saure Lösungen auf Carbonate einwirken, umso ausgeprägter ist das Krustenwachstum. Schematisch lässt sich der Carbonatabbau durch schwefelsaure Lösungen mit folgender Umsetzung beschreiben:



Die Gleichung besagt, dass Kalkstein (Calciumcarbonat,  $\text{CaCO}_3$ ) durch eine schwefelsaure Lösung (Schwefelsäure und Wasser,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und  $\text{H}_2\text{O}$ ) in Gips umgewandelt wird ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) und das Carbonat in Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) übergeht. Entscheidend für den Reaktionsverlauf ist die Entstehung eines chemisch stabilen Feststoffs (Gips) und einer chemisch labilen Säure (Kohlensäure). Da praktisch keine Rückreaktion stattfindet, wird das Gleichgewicht auf die rechte Seite verschoben, so dass am Ende aller Reaktionszyklen immer wieder Gips steht.

Dunkle und schwarze Krusten können sich immer dann formieren, wenn das Feuchteangebot hoch ist oder Feuchtesorbatfilme vorliegen. Schadgase, Ruß, Schmutz, Feinstaub und Aerosole werden zunächst physisorbiert und anschließend durch Lösungs- und Fällungsreaktionen in eine unlösliche, chemisch stabile Form überführt. Auf diese Weise wird mit der Zeit das gesamte Kompendium an luftverunreinigenden Substanzen in einer gipsgestützten Matrix zu einer irreversiblen, kompakten Masse verbacken. Das Ergebnis ist ein spannungsreicher Belag, der einem Schadstoffreservoir gleicht, das aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften und chemischen Reaktivität keine schützende Funktion besitzt – von der ästhetischen Beeinträchtigung der strukturierten römischen Oberfläche ganz zu schweigen. Krusten finden sich auf dem Kalkstein und auf sämtlichen Ausbesserungsmörteln. Die Krustenproblematik soll an zwei Beispielen veranschaulicht werden.

### Krusten auf Malschichten

Die Kalktünchen auf dem Segmentbogen des ehemaligen Einganges an der Nordostseite belegen die langjährige Nutzung dieses Bereichs als Innenraum, der von

äußeren Umwelteinflüssen weitgehend abgeschottet war. Das markanteste Kennzeichen heute sind aber nicht die Tünchen, sondern ist die wellenartig aufgewachsene Kruste, die zu einer Dicke von 2 mm anwachsen konnte. Da an dieser Stelle im Jahr 1958 keine nennenswerte Reinigung erfolgte – der Bereich war mit der Gartenmauer von 1913 überbaut – und erst der Abriss des Sudhauses 1910 den Innenraum zu einem Außenraum machte, ist das Alter der Kruste auf 90 Jahre zu taxieren.

Analysiert man den schwarzen Belag hinsichtlich seiner mineralischen und organischen Komponenten, ist festzustellen, dass Gips dominiert. Die Verteilung innerhalb der Kruste beträgt 76 % Gips, 15 % Calcit und 9 % Quarz.<sup>6</sup> Gips ist als Korrosionsprodukt zu werten und der Quarzanteil auf Zuschläge und Verschmutzungen durch Stäube zurückzuführen, während das Calciumcarbonat auf Anstrichresten und sekundärer Calcitbildung beruht. Auffallend hoch ist der Kohlenstoffanteil (5 Ma.-%)<sup>7</sup> sowie der Gehalt an organischen Verbindungen, der sich auf etwa 2,0 Ma.-% summiert. Das Vielstoffgemisch zeichnet sich durch eine Vielzahl an Kohlenwasserstoffverbindungen aus, die Verbrennungsrückständen zuzurechnen sind. Als typischer Indikator können polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK/PAH) benannt werden, die mit einem Gehalt von 530 µg/kg in den Proben als deutlich erhöht einzustufen sind.<sup>8</sup>

### Krusten auf Putz und Kalkstein

Die Krusten auf den Kalksteinquadern sind sehr unterschiedlich. Kalksteinoberflächen mit mittelalterlichen Mörtelresten zeichnen sich durch eine dünne Schmutzzone auf einer weitgehend intakten carbonatischen Phasengrenze aus. Die korrosive Veränderung des Kalksteins ist gering und durch Gips- und Calciumoxalatabscheidungen charakterisiert – der Mörtel ist dagegen von Gips durchsetzt und hatte die Funktion einer Verschleißschicht. In den Bereichen der Putzschlämme hat man es deshalb nicht mit einem Kalkstein-, sondern mit einem Mörtelkonservierungsproblem zu tun.

Andere Krusten haben sich auf dem 1958 aufgebrachten und zusätzlich retuschierten Sumpfkalkmörtel formiert. Es dominiert Gips, der durch hohe Anteile an Feinstaub (Silicate, Aluminosilicate) und organische Fremdstoffe tief verschwärzt ist (Ruß, komplexe organische Verbrennungsrückstände). Die Krusten sind als rezent einzustufen und dem sauren Abbau des carbonatischen Bindemittels unter Einbindung eines 40jährigen Schadstoff- und Staubcocktails zuzuschreiben.

Anders verhält es sich mit dem tiefschwarzen Belag auf der Nordwestseite des Turmes „... in einer Zone, die vom Boden aus bis in drei Meter Höhe reicht“.<sup>9</sup> An dieser Stelle ist das Gestein von einem schwarzen Belag bedeckt, der die Topographie der Oberfläche perfekt nachzeichnet und von einem verschwärzten Mörtel überlagert wird. An den Fugenflanken der mörtellos versetzten Quader hat sich eine

<sup>6</sup> Bestimmung durch Röntgendiffraktometrie von Pulverproben (XRD).

<sup>7</sup> Bestimmung durch Quantifizierung des Gehaltes an Gesamtkohlenstoff.

<sup>8</sup> PAK bilden sich bei unvollständigen Verbrennungsprozessen (Hausbrand, Autoverkehr, Räuchern, Grillen, etc.) und sind ein Beleg für die bedenkliche Luftqualität während der letzten 90 Jahre. Ihre Bestimmung erfolgte durch HPLC (Fluoreszenz- und PDA-Detektion). Von den 530 µg/kg an PAK entfallen auf Phenantren (117), Pyren (96), Naphtalin (69) und Benzo(a)pyren (46); Analyse nach BbodSchV, Anhang 1, 3.1.3.

<sup>9</sup> Zit. nach Hörmann, H. (1962), Die Instandsetzung der Porta Praetoria in Regensburg. Der Naturstein 17:74–75.

dichte schwarze Kruste abgeschieden, die aus 71 % Gips, 23 % Quarz, 5 % Weddellit und Larnit besteht.<sup>9</sup> Der Kohlenstoffanteil ist hoch (3 bis 5 Ma.-%), während der organische Anteil mit etwa 1 Ma.-% geringer als in der beschatteten Zone an der Nordostecke ist. Auch der Gehalt an PAK ist mit 134 µg/kg im Vergleich zur Kruste auf der Ostseite geringer.<sup>10</sup> Drastisch hoch sind die Gehalte an leichtlöslichen Salzen, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

Bewertet man die unterschiedliche Krustenbildung, so ist der schwarze Belag auf der Nordseite als rezente Kruste zu klassifizieren, die primär in den Jahren nach 1958 entstanden ist. Die rußschwarz getränkte Schicht darunter ist aber älteren Datums und könnte durchaus mit dem auf Fotografien von 1888 zu sehenden schwarzen „Schmutzabdruck“ des ehemaligen Vorbaus identisch sein.

Aus der vergleichenden Analyse der Krusten und Oberflächenbeläge lässt sich noch ein weiterer Befund ablesen. So sind neben dem alles beherrschenden Gips und Zementkomponenten 5 Ma.-% an Calciumoxalat enthalten. Das mikrobiell induzierte Calciumsalz der Oxalsäure ist bevorzugt an der Krustenunterseite im Übergang zum originalen Kalkstein nachzuweisen. Gerade der Vergleich der Krusten auf der lange Jahre geschützten Ostseite mit denen auf der exponierten und viel benutzten Nordwestseite liefert erstaunliche Erkenntnisse. So ist festzuhalten, dass sich beide Grenzflächen durch eine abgedunkelte, leicht bräunliche Übergangszone aus Gips, Calciumoxalat und Calcit auszeichnen.<sup>11</sup> Quader der Ostseite werden, soweit sie nicht thermisch vorgeschädigt sind, von einer natürlichen Alterungsschicht aus Calciumoxalat und Calciumcarbonat dominiert („Wetterkruste“), die erst in einem sekundären Prozess durch schwefelsaure Lösungen überformt wurde. Das Gestein auf der Nordwestseite ist dagegen im höchsten Maße zersetzt, weich und mürbe und zeigt eine Korrosionstiefe von 2 bis 3 mm. Gips dominiert das Gefüge, daneben finden sich komplexe Sulfate und Chloride.

Die expositionsbedingten Unterschiede lassen sich auf die extreme Belastung der Nordwestseite als Folge der freien Exposition des Gebäudeteils und die Akkumulation von Schadstoffen zurückführen. Dem hatte die über Jahrhunderte aufgebaute natürliche Patina des Kalksteins wenig entgegenzusetzen.

### *Altlasten der Nutzungs-, Expositions- und Restaurierungsgeschichte*

Dass die Folgen der Nutzungs- und Restaurierungsgeschichte zu einem zentralen Thema in der Beschreibung der Schadensphänomene werden würde, war so nicht vorauszusehen. Ein Grund ist, dass die höchst problematische Situation der Altlasten in und auf dem Kalkstein der porta praetoria nur in einigen wenigen Monaten des Jahres wirklich sichtbar wird. Das Kompendium an Schadstoffen verbirgt sich hinter anderen Schäden und drängt sich nicht so offensichtlich in den Vordergrund, wie das unansehnliche schwarzbraun der Gips- und Kotkrusten. Das Problem lässt sich unter dem Oberbegriff „leichtlösliche bauschädliche Salze“ subsumieren und dürfte weit über das erwartete Maß hinaus Bedeutung für die künftigen Maßnahmen haben. Drei Befunde sind hierbei von Bedeutung.

<sup>9</sup> Weddellit ist Calciumoxalat Monohydrat, Larnit eine Zementphase (C<sub>2</sub>S). Bestimmungsmethode: XRD.

<sup>10</sup> Von den 134 µg/kg an PAK entfallen auf Phenantren (17), Naphtalin (18) und Benzo(a)pyren (13); es überwiegt Fluoranthen (29).

<sup>11</sup> Bestimmung durch stufenweise FT-IR-Mikrospektrometrie des Oberflächenprofils.

#### a) Chloride aufgrund von Reinigungsrückständen und Streusalzen:

Auffallend waren die während der Mörtelanalysen wiederholt auftretenden hohen Konzentrationen von *Halit* in den Staubfraktionen des Bindemittels.<sup>12</sup> *Halit* ist gemäß seiner chemischen Zusammensetzung Kochsalz (NaCl) und eine für Bauwerke nicht gerade übliche Verbindung. Das bekanntermaßen leichtlösliche Salz ist in einer ganzen Reihe von Mörteln an der porta praetoria in Konzentrationen von 3 bis 9 Ma.-% allgegenwärtig. Die Gehalte liegen weit über durchschnittlichen Werten und können nur auf einem extremen Salzeintrag von außen beruhen, da der verwendete Kalkstein keine Salze enthält.

Eine Ursache für das Vorkommen von *Halit* können Streu- und Tausalze sein, die bis in die jüngere Zeit aus gemahlenem Steinsalz bestanden, das mit Kochsalz weitgehend identisch ist. Dass Streusalze die immense Schadstoffbelastung der Kalksteinoberflächen mit zu verantworten haben, zeigt die Anwesenheit von Tachyhydrit (einem Calcium-Magnesium-Chlorid),<sup>13</sup> das an der Nordwestfassade unterhalb der Rundbogenfenster in Konzentrationen von 4 Ma.-% vorkommt und mit Streusalzmischungen auf der Basis von Calcium-Magnesium-Chloriden erklärt werden kann.<sup>14</sup> Durch die Lage der porta praetoria an der stark frequentierten, sehr schmalen Straße sind die Befunde durchaus erklärbar, denn Spritzwasser und lösliche Salze können leicht über die mit Krusten bedeckten Oberflächen und Fugmassen in beträchtliche Höhen transportiert werden.

Ein zweiter Grund für die hohen *Halit*konzentrationen kann die Reinigung mit Hackerscher Steinbeize von 1958 sein, denn die höchsten Konzentrationen des Salzes finden sich mit 9 Ma.-% auf der straßenabgewandten Ostseite des Turmes. Dabei ist eine alkalische Reinigung (Natronlauge als Natriumlieferant) ebenso denkbar wie eine Säurebehandlung (Salzsäure als Chloridlieferant). Wahrscheinlicher ist jedoch die alkalische Reinigung, denn als Chloridquellen kommen auch Viehhaltung oder Fäkalgruben oder schlechte Zementmörtel mit ungewaschenen Sanden in Betracht. Hohe Natriumgehalte sind aber häufig ein Indikator für die übertriebene Anwendung alkalischer Reinigungsmittel.

#### b) Nitrate aufgrund einer Stallung im Ostturm?

Die Salzbelastung der Mörtel im Kellergeschoss der porta praetoria ist außergewöhnlich hoch. Neben *Halit*, das wiederum in Konzentrationen bis 7 Ma.-% vorliegt, dominieren Nitronatrit (Natriumnitrat), das bis zu 20 Ma.-% in den Staubfraktionen der extrem feucht wirkenden Mörtel betragen kann. Daneben finden sich eine Reihe von Sulfaten (Gips, Natriumsulfate) mit recht geringen Konzentrationen, die selten 3 Ma.-% übersteigen.

Während die Sulfate auch aus Zuschlägen im Mörtel stammen können (Gipsmörtel, Zementmörtel mit Gipszusatz), ist die exorbitant hohe Menge an Nitraten

<sup>12</sup> Zementmörtel Nordostseite (1227/4; oberhalb des Segmentbogens), Datierung 1958: 5 Ma.-% *Halit*; Zementmörtel Nordostseite (1227/5; oberhalb des Segmentbogens), Datierung 1910: 3 Ma.-% *Halit*; Kalkzementmörtel Westseite (1227/8; Regenrinne), Datierung 1958: 6 Ma.-% *Halit*; Kalkzementmörtel Ostseite (1227/14; Fassadenmitte), Datierung 1958: 9 Ma.-% *Halit*; rötlicher Kalkmörtelputz Ostseite (1227/17; Fassadenmitte), Datierung 1885: 8 Ma.-% *Halit*.

<sup>13</sup> Chemische Formel:  $\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \times 12 \text{H}_2\text{O}$ ; Mörtelprobe 1227/20; Kalkmörtel mit Zementzusatz; Datierung: nd.

<sup>14</sup> Eine zweite Möglichkeit ist die Verwendung von Sorel-Zement, der seit 1910 Verwendung fand, aber restauratorisch nicht nachzuweisen war.

(„Natriumsalpeter“) wohl nur durch eine mehrjährige Nutzung des Untergeschosses als Stallung oder Fäkalgruppe erklärbar, für die es archivalisch jedoch keine Belege gibt.<sup>15</sup>

c) *Schadstoffreservoir Gipskruste:*

Analysiert man die Krusten auf der Oberfläche der porta praetoria, so ist, wie beschrieben, Gips (Calciumsulfat Dihydrat) mit mehr als 70 Ma.-% die unumstrittene Hauptkomponente, die mit unterschiedlichen Nebenkomponten vermengt ist, beispielsweise Quarz (Siliciumdioxid), Calcit (Calciumcarbonat) oder Weddellit (Calciumoxalat Monohydrat).

Nimmt man diese Kruste durch eine Reinigung ab und reduziert auf diese Weise den Schadstoffgehalt an der Phasengrenze, wie das an der Musterfläche der Nordwestseite geschehen ist, verbleibt eine gelbliche Kalksteinoberfläche, die keineswegs homogen aufgebaut ist und noch erhebliche Mengen an löslichen Salzen enthält. Nach der Analyse von zwölf Schabeproben aus den Bereichen der Musterfläche zur Konservierung, ergeben sich mittlere Werte für den Gehalt an Sulfaten, für die sich rechnerisch eine Salzbelastung von 22 Ma.-% ermitteln lässt.

Röntgenographisch ist primär Gips nachweisbar, der als Korrosionsprodukt anzusehen ist und nur mittels drastischer Reinigungen aus der originalen römischen Oberfläche entfernt werden kann. Erstaunlich hoch ist aber immer noch die Konzentration an Nitronatrium (5 Ma.-%) und Halit (1 bis 2 Ma.-%), die sich in der korrodierten Kalksteinoberfläche angereichert haben und als hygroskopische Salze in Form von fleckigen Feuchtehorizonten sichtbar sind (siehe Abb. 63). Es ist also nicht der Gips alleine, der für die Zersetzung der Kalksteinoberfläche verantwortlich ist – vielmehr ist es die Mischung aus hygroskopischen Salzen, Tausalzen, Reinigungsrückständen und Gips.

### *Unterschätzte Gefahren*

Eine ernüchternde Feststellung bei der makroskopischen Bestandsaufnahme der Kalksteinfazies und der Schadenserfassung war die bedrohliche Gefährdung der Kalksteinquader durch chaotisch verlaufende Risse, die als das dritte zentrale Schadensphänomen an der porta praetoria genannt werden müssen. Der Schadensumfang wird durch die Oberflächenbeläge kaschiert und offenbart sich erst bei der gemeinsamen Betrachtung der durch Abklopfen festgestellten Hohlstellen und der kartographischen Dokumentation der Rissverläufe.

Das Ausmaß der Schalenbildungen ist weitaus größer als angenommen: In der Regel sind zusammenhängende Quaderbereiche betroffen und das Ablösen ganzer Oberflächenschalen in der Stärke mehrerer Zentimeter zu beobachten. Auf den römischen Originalbestand des Ostturm bezogen ist jeder vierte Quader geschädigt (25 %), am Rundbogenportal ist es jeder zweite Werkstein (50 %). Rechnet man offene Risse hinzu, die als das erste Anzeichen des Abschälens von Originalsubstanz gewertet werden können, so erhöht sich die Rate der schadhafte Werksteine am Ostturm auf 50 bis 60 % (siehe Anhang: Bestandsdokumentation C.5, S. 191, Schadensphänomene II).

<sup>15</sup> Im Anhang zu diesem Kapitel sind die Mineralphasen und Anionengehalte angegeben. Die Messungen erfolgen mit Röntgendiffraktometrie (Bestimmung der Mineralphasen) und Ionenchromatographie (Bestimmung bauschädlicher Anionen). (Anhang C.6 bis C.8).

Die Ursache für das komplexe Rissmuster kann in den Bewegungen innerhalb der Mauerschale oder Fundamentsetzungen begründet sein. Die Überlastung der äußeren Mauerschale durch den Aufbau lokaler Druckspannungen und die Kippbewegung nach Norden, ist eine mögliche Erklärung für das Schadensbild der mörtellos versetzten, unmittelbar aneinander gefügten Werksteine mit grob bossierten Fugenflächen. Hinzu kommt die thermische Belastung der Oberflächen, die anhand der Rotfärbung der Nichtcarbonate im Kalkstein zu indizieren ist und durch heftige Brände im Turm und an den Außenfassaden hervorgerufen worden sein muss.

Die Gesamtsituation ist als durchaus kritisch zu bewerten. Ob es sich um einen Altschaden handelt, der bereits durch die eisernen Zuganker im Mittelalter weitgehend behoben wurde, oder ob die Zerrüttung der Mauerschale und der Steinquader durch verkehrsbedingte Vibrationen verstärkt wurde bzw. wird, sollte Gegenstand einer gesonderten statischen Untersuchung sein. Tatsache ist, dass man bei der Beurteilung des heutigen Zustandes nicht von einem intakten Mauerwerk ausgehen kann – man hat es eher mit einer vielfach geklüfteten und auseinander gewanderten Mauerschale aus ruinös gerissenen Einzelquadern mit stark geschwächten Querschnitten zu tun. Daher sollte der Sicherung der Mauerschale und der Sanierung der zerklüfteten Quader während der kommenden Restaurierung erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

#### 4 Zusammenfassung der Befunde

Die Fragmente der römischen porta praetoria vereinigen in sich eine lange Expositions-, Veränderungs- und Nutzungsgeschichte. Sichtbare Zeichen sind neben der Dezimierung des Originalbestandes die Spuren der mittelalterlichen Nutzung des Bauwerks und die bedrohliche Anreicherung von umweltbedingten und anthropogen induzierten Schadstoffen.

Farbbefunde oder historisch bedeutsame Details, die für die Authentizität des Bauwerks über die römische Geschichte hinaus von entscheidender Bedeutung wären, sind nur in bescheidenem Umfang nachweisbar. Die bedeutsamsten Belege für den mittelalterlichen Bestand sind ohne Zweifel die zusammenhängenden Fragmente einer Putzschlämme auf der Etage der noch erhaltenen Rundbogenfenster. Der Putz ist mit hoher Wahrscheinlichkeit in eine der Ausbauphasen des Bischofshofes im 13. bis 15. Jahrhundert zu datieren. Insofern kann man sich bei der Sanierung des Baudenkmals nicht auf die Restaurierung und Konservierung des römischen Quadermauerwerks aus Kalkstein beschränken, sondern muss die Erhaltung der frühmittelalterlichen Putze in das Konservierungskonzept integrieren.

Die Erhaltung der römischen Mauerschale ist keine triviale Aufgabe. Das liegt an der wehrhaften Geschichte der Militäranlage und der vielfachen Nutzung der Räumlichkeiten sowie der Restaurierung der Fassaden nach 1885. Die Geschichte hat ihre Spuren in Form von Bränden und der damit verbundenen thermischen Vorschädigung der Kalksteine hinterlassen. Ob Vernachlässigung oder zerstörerische Angriffe für das Auseinanderwandern der Mauerschale und die bedrohliche Kippbewegung verantwortlich sind, lässt sich nicht mehr rekonstruieren. Tatsache ist, dass der ruinöse Zustand erst im Mittelalter statisch stabilisiert wurde und anschließend eine lebhafte Nutzungsgeschichte einsetzte, die sich in der Verringerung des Mauerquerschnitts, dem Durchbrechen der Mauern und der Gebäudenutzung als Wohnung, Gewerberaum und Stallung manifestierte.

Die Kernpunkte künftiger Maßnahmen lassen sich an den Mängeln und Beeinträchtigungen des Kalksteinbestandes festmachen. Besonderes Augenmerk muss auf die Abnahme und Reduzierung der schwarzen Beläge und Krusten gerichtet werden, die ein Konglomerat aus Korrosionsprodukten, Schadstoffen und Altlasten der jüngeren und jüngsten Geschichte sind. Die nutzungsbedingten Altlasten betreffen in gleicher Weise das Rundbogenportal und waren wohl einer der Gründe für die Jahrzehnte nicht bewältigte Problemzone im Erdgeschossbereich des Bischofshofes, die in den vergangenen 120 Jahren fünfmal verputzt werden musste.

Fatal für den Kalkstein waren die lange Zeit herrschenden sauren Umweltbedingungen, die zur Formierung von Gipskrusten geführt haben. Ebenso fatal war aber auch der Betrieb der Fassbinderei und die vermutete Nutzung des Kellers im Ostturm als Stallung, die wohl beide ursächlich zu dem Eintrag erheblicher Mengen von Nitraten und Chloriden beigetragen haben. Heute finden sich hygroskopische Salze, vom Kellergeschoss ausgehend, auf der gesamten Fassade verteilt bis in Höhe der Rundbogenfenster. Besonders belastet sind die Fug- und Reparaturmörtel sowie die inhomogene Oberflächenkruste.

Zu weiteren, als kritisch zu wertenden Restaurierungs- und Vorsorgemaßnahmen gehören die Reinigung der Kalksteine mit vermutlich alkalischen Beizen im Jahr 1958 und der fortgesetzte Kontakt mit Tausalzen. Auch wenn die Ursachen nicht vollständig geklärt sind, so ist die extrem hohe Konzentration an Natrium- und Calciumchloriden und -sulfaten höchst bedenklich und bedarf baldiger Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung, da der immense Gehalt an hygroskopischen Verbindungen die Korrosion der thermisch vorgeschädigten Quader an der Ostfassade und dem Torbogen in den letzten 40 Jahren ohne Zweifel beschleunigt hat. Der Korrosionsprozess wurde durch den Salzeintrag in Gang gesetzt und durch Kristallbildung und das Wiederlösen der Salze am Leben gehalten, was eine tiefreichende Zerrüttung der Quader zur Folge hatte. Ohne Reduzierung der Salzfracht ist die Konservierung der Quader ausgeschlossen und ihr weiterer Zerfall unvermeidlich.

Eine weitere, sehr ernst zu nehmende Auswirkung der extrem hygroskopischen Chloride und Nitrate betrifft die beschleunigte Wiederverschmutzung und Vergipsung der Oberfläche durch das Vorhandensein effektiver Feuchtesorbatfilme. Alleine dieser Umstand würde eine rasche Maßnahme zur Reinigung und Entsalzung rechtfertigen.

In letzter Konsequenz sprechen die Befunde dafür, nicht nur die Oberflächenbeläge und die Restauriermörtel des letzten Jahrhunderts abzunehmen. Einzuplanen ist ebenso die Entsalzung des Bauwerks, der Aushub des kontaminierten Bodens im Kellerraum und die Entfernung der schadstoffbelasteten Mörtel sowie die Dekontamination der gesamten Außen- wie Innenseite mit einer anschließenden Maßnahme zum Porenraumschutz. Darüber hinaus darf die statische Konsolidierung der Mauerschale und die Sicherung der zerklüfteten Quader nicht vergessen werden.

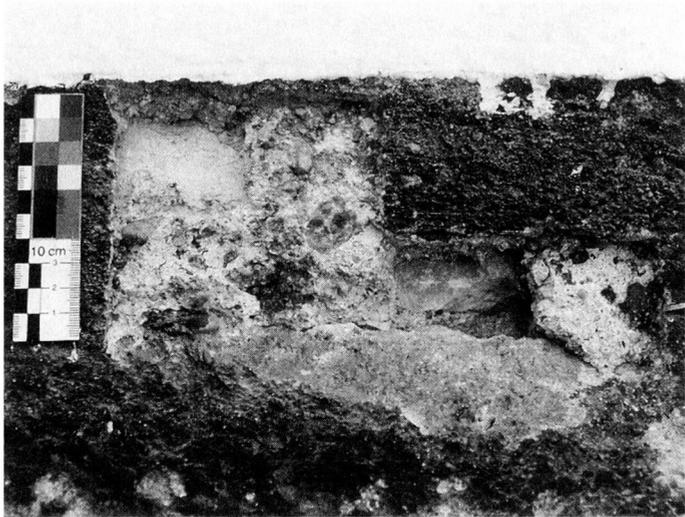
Erst nach der gewissenhaften Bearbeitung der angesprochenen Maßnahmen wird man die Altlasten der vergangenen Jahrhunderte soweit reduziert haben, dass der Kalkstein der porta praetoria eine echte Chance auf eine dauerhafte Erhaltung besitzt.



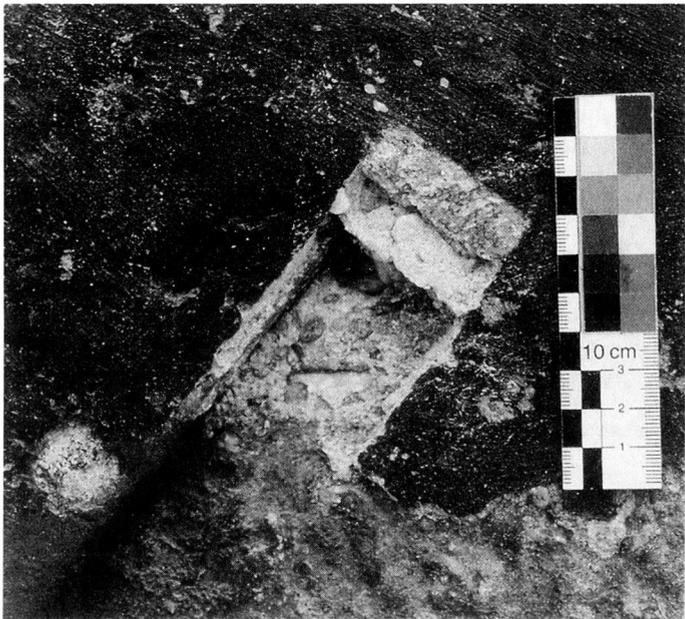
47: Flächendeckender schwarzer Belag auf sämtlichen Oberflächen der porta praetoria; es sind keine Differenzierungen möglich, die Ansprache der Werkstoffe – Mörtel, Kalksteinfazies, andere – ist sehr erschwert. Aufnahme vor der Reinigung (Detail der Nordseite des Ostturms, Augenhöhe; 2001)



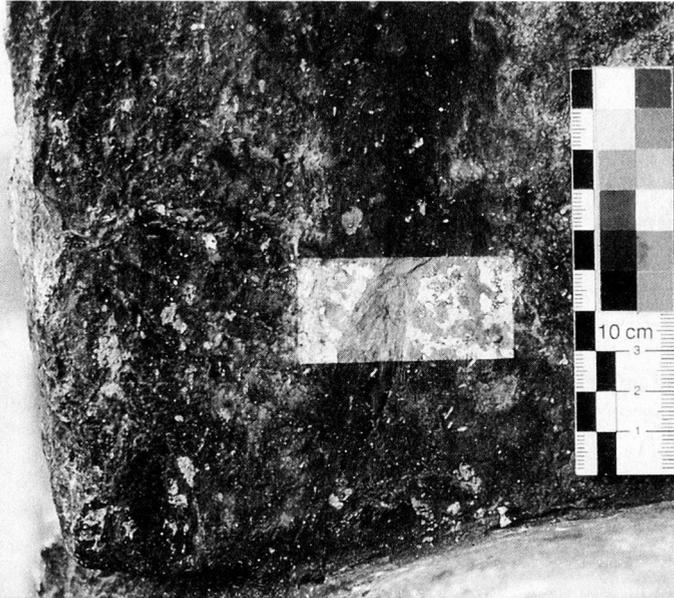
48: Befundschnitt durch den Putzmörtel von 1958 bis zum ersten nachweisbaren Mörtel, der aufgrund der Zusammensetzung und stratigraphischen Lage am Bauwerk als frühmittelalterlich zu klassifizieren ist. Dazwischen liegen ein spätmittelalterlicher Mauermörtel mit Ziegelsteinen (15. Jh.) und ein Ausbesserungsmörtel auf Zementbasis (1910). (Ostfassade Rundbogenfenster).



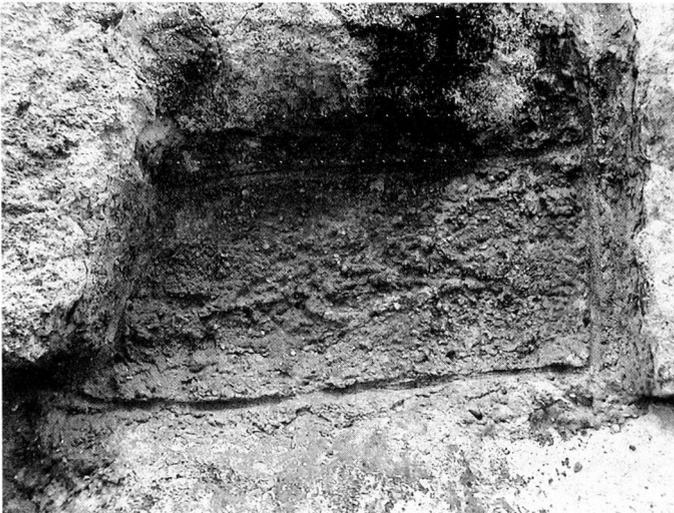
49: Ansicht eines stark verschmutzten Putzmörtels, der auf eine verschmutzte Steinoberfläche aufgetragen wurde und zu der Ausbauphase des Obergeschosses zu rechnen ist. Aufgrund der Zusammensetzung sollte der Putz zu dem frühmittelalterlichen Mauermörtel gehören. Der Befund wird von einem dünnen Zementmörtel überdeckt (1958). (Nordfassade).



50: Befundschnitt, der einen extrem verschwärzten Putzmörtel mit grauer Farbe zeigt (Kalkmörtel von 1948 oder 1958 mit grauer Retusche), unter dem sich ein kieselhaltiger Putz- und Mauermörtel verbirgt, der zur statischen Sicherung zu rechnen ist (Einbau der Eisenanker; t. a. q. 15. Jh.).



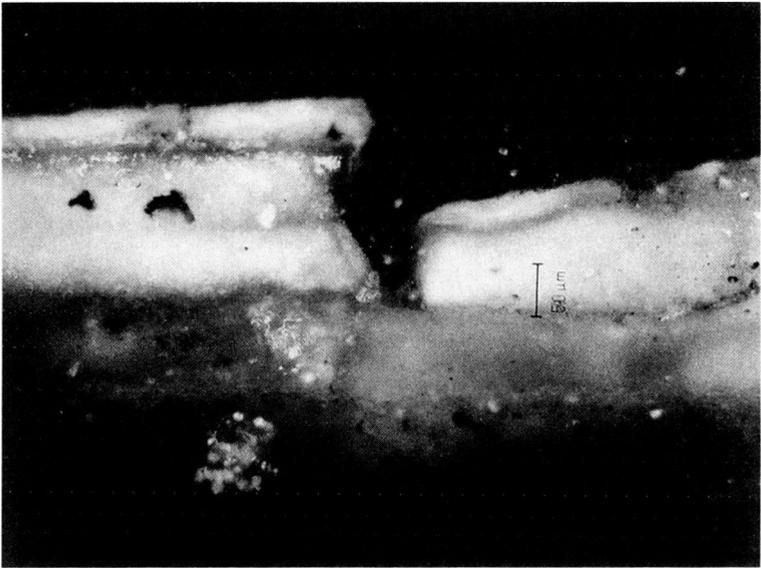
51: Befundschnitt in der Laibung des 1910 vermauerten Rundbogenfensters an der Ostfassade. Unter der Schmutzschichten, liegen großzügige Ausbesserungen mit einem bindemittelreichen Zementmörtel (Datierung: vermutlich 1910).



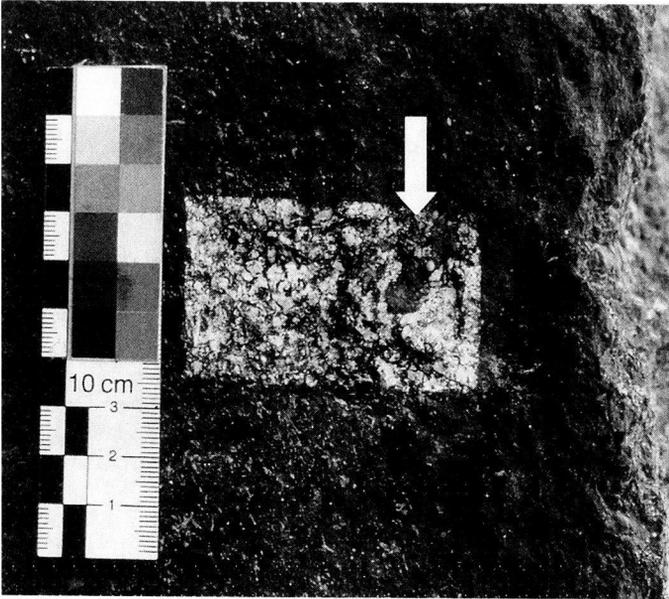
52: Fragmente der Reparatur um 1948 (Wandvermauerung am Torbogen); die Mörtelantragungen zeichnen sich durch eine sehr einfache Fugenritzung in einem sehr groben Zementmörtel aus.



53: Segmentbogen des kleinen Portals, das in den Ostturm führt (Eingang Sudhaus); oberhalb des Sturzes ist das Mauerwerk mit Grünsandstein ausgemauert, in der Umgebung sieht man die aufgerauten Putzflächen von 1958 auf dem Putz von 1910.



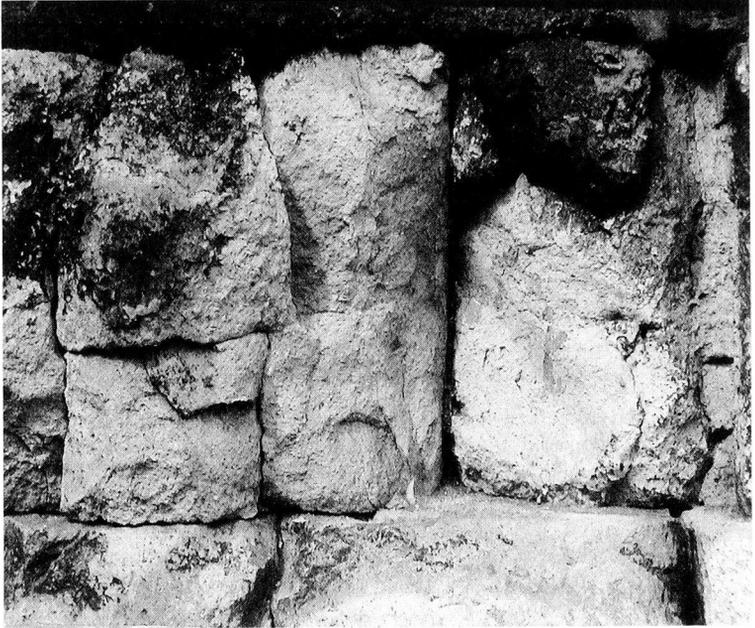
54: Anschliffpräparat von Tüncheschichten auf der Werksteinoberfläche eines Kalksteinquaders, der von der angebauten Ziegelmauer des Sudhauses bis 1910 verdeckt war. Es handelt sich um zwei bis drei bleiweißhaltige Weißfassungen mit Craquelerrissen auf einer ockerfarbenen Tünche. Der älteste Anstrich gehört zu der frühmittelalterlichen Putzschlämme.



55: Befundschnitt zu der Situation in den Laibungen der nordwestlichen Rundbogenfenster. Unter Schmutzschichten liegen intensiv rote Einschlüsse (Eisenoxid), bei denen es sich nicht um Farbspuren, sondern um Hämatitbildung durch Brandeinwirkung handelt (Pfeilmarkierung).



56: Rissbildungen in den Kalksteinquadern auf der Westseite des östlichen Flankenturms (siehe kartographische Zustandserfassung).



57: Thermisch vorgeschädigte Kalksteinquader mit ruinösem Verwitterungsbild (Abschuppen des rötlich verfarbten Gesteins); Ostfassade des westlichen Flankenturms.

## ANHANG Teil C: Begleitende Untersuchungen am Objekt

- Anhang C.1: Kartographische Bestandsaufnahme Materialinventar – Kalksteine, Faziestypen (S. 187)
- Anhang C.2: Kartographische Bestandsaufnahme Materialinventar – andere Materialien (S. 188)
- Anhang C.3: Kartographische Bestandsaufnahme Materialinventar – Putzmörtel und Fugmassen (S. 189)
- Anhang C.4: Kartographische Bestandsaufnahme Schadensphänomene I (S. 190)
- Anhang C.5: Kartographische Bestandsaufnahme Schadensphänomene II (S. 191)
- Anhang C.6: Zusammensetzung der Fugenmörtel (S. 140).
- Anhang C.7: Anionengehalte in den Staubfraktionen der Mörtel aus dem Kellergeschoss der porta praetoria; die Nummerierung entspricht den Probenahmestellen (Angaben in g/kg) (S. 141).
- Anhang C.8: Anionengehalte in Schabeproben nach der Reinigung (Musterfeld 2) vor der Applikation der kombinierten Beschichtungssysteme; die Nummerierung entspricht dem Probefeld der Konservierungsversuche (Angaben in g/kg) (S. 141).

Anhang C.6: Zusammensetzung der Fugenmörtel

Probe	Datierung	H <sub>2</sub> O-löslich (Salze)	HCl-löslich (CaCO <sub>3</sub> )	HCl-löslich (gesamt)	Hydraulische Anteile	B/Z	Bindemittel Kurzcharakterisierung
		[Ma.-%]	[Ma.-%]	[Ma.-%]	[Ma.-%]		
1227/1	1958	1,55	10,0	14,0	3,72	0,24	Zementmörtel mit Kalkzusatz
1227/4	1958	3,19	11,0	11,9	-	-	Zementmörtel mit Kalkzusatz
1227/5	1910/1948	4,53	20,0	22,6	3,09	0,43	Kalkzementmörtel
1227/6	1910/1948	0,81	20,0	23,4	4,31	0,40	Kalkzementmörtel
1227/8	1958	8,31	13,0	17,5	1,55	0,37	Kalkzementmörtel
1227/9	1910	3,39	16,0	37,7	7,63	0,95	Kalkzementmörtel
1227/10	1958	2,43	12,0	26,0	4,35	0,49	Kalkzementmörtel
1227/13	1958	3,40	31,0	33,2	1,54	0,62	Sumpfkalkmörtel
1227/14	1910	8,73	16,0	24,3	3,86	0,59	Kalkzementmörtel
1227/15	1958	3,40	14,0	15,2	3,43	0,28	Zementmörtel mit Kalkzusatz
1227/17	Vor 1910	10,21	24,0	36,8	8,02	1,22	Hydraul. Kalkmörtel
1227/20	1910/1948	4,25	29,0	53,0	7,29	1,82	Kalkzementmörtel, Sorelzement ?

Phasenanalyse der Staubfraktion (Bestimmungsmethode: Röntgendiffraktometrie; Angabe in %)							
	Calcit	Aragonit	Dolomit	Gips	Syngentit	Quarz	Andere
1227/1	51	-	5	3	2	29	Analcim (Zeolith) 3%, Albit + Mikroklin 6%, Muskovit 1%
1227/4	53	-	3	3	2	25	Halit (Steinsalz) 5%, Analcim (Zeolith) 4%, Albit + Mikroklin 4%, Muskovit 1%
1227/5	54	-	4	1	-	34	Halit 3%, Albit + Mikroklin 4%
1227/6	67	7	6	-	-	16	Albit 4%
1227/8	66		4	1		19	Halit 6%, Albit 4%
1227/9	43	-	4	-	-	42	Larnit (Zementphase) 2%, Albit + Mikroklin 4%, Muskovit 2%, C <sub>3</sub> A (Zementphase) 3%
1227/10	23		3	2		66	Mikroklin 4%, C <sub>3</sub> A (Zementphase) 2%
1227/13	83		5	4		7	Albit 1%
1227/14	54		5	2		23	Halit 9%, Albit 3%, Vaterit 4%
1227/15	67	-	3	3	-	14	Halit 6%, Analcim 3%, Mikroklin 2%, Muskovit 2%
1227/17	66	-	-	10	-	16	Halit 8%
1227/20	64	-	4	3	-	22	Tachyhydrit 4%, Larnit 2%, Muskovit 1%

Anhang C.7: Anionengehalte in den Staubfraktionen der Mörtel aus dem Kellergeschoss der porta praetoria; die Nummerierung entspricht den Probenahmestellen (Angaben in g/kg).

Probe	Chloride	Nitrate	Sulfate
10.07.01/4	27,179	54,185	2,281
10.07.01/5	26,146	40,260	2,881
10.07.01/6	6,548	47,964	60,827
10.07.01/7	12,366	54,111	13,874
10.07.01/8	15,330	104,184	10,900
11.07.01/1	4,724	14,325	446,078
11.07.01/2	2,622	2,720	3,975
14.07.01/1	32,951	28,560	37,349
14.07.01/2	2,632	0,896	1,133
10.07.01-F1	9,055	15,363	0,838
14.07.01-F1	11,806	56,556	60,083
14.07.01-F2	2,108	8,091	0,514

Anhang C.8: Anionengehalte in Schabeproben nach der Reinigung (Musterfeld 2) vor der Applikation der kombinierten Beschichtungssysteme; die Nummerierung entspricht dem Probefeld der Konservierungsversuche (Angaben in g/kg).

Probe	Chloride	Nitrate	Sulfate
P 1	8,472	25,833	111,806
P 2	14,171	26,629	124,000
P 3	17,759	36,724	170,690
P 4	6,707	25,269	120,000
P 5	5,989	28,588	118,983
P 6	7,429	30,286	116,114
P 7	5,393	28,090	106,629
P 8	4,651	24,496	78,605
P 9	6,264	34,396	117,473
P 10	4,697	29,697	114,242
P 11	3,609	25,263	119,549
P 12	4,043	22,766	96,383

## Teil D: Neue Konzepte in der Kalksteinkonservierung an der porta praetoria

### 1 Entwicklung eines Konservierungskonzeptes

#### *Anforderungen an das Konzept*

Fasst man den an der porta praetoria angetroffenen Zustand zusammen, so sind die Ursachen für das problematische Erscheinungsbild der Kalksteine in der Expositions-, Nutzungs- und Restaurierungsgeschichte des Baudenkmals begründet. Die Lage des Gebäudes im Zentrum der Altstadt am Rande einer vielbefahrenen Straße, die räumliche Enge und die Belastung des säurelabilen Gesteins durch aggressive Umweltschadstoffe sind für den unansehnlichen schwarzen Belag aus Staub, Schmutz und Gips verantwortlich zu machen.

Bei der Konzeptentwicklung standen Fragen der Substanzerhaltung und des Schutzes der Kalksteinoberflächen im Mittelpunkt. Beide Themengebiete umreißen an sich komplizierte Sachverhalte und Probleme, deren Lösung Meilensteine in der angewandten Forschung wären.

Kalkstein ist nicht für eine feuchte, schwefelsaure Umgebung gemacht. Saure Umgebungsbedingungen zersetzen das in Reinluftgebieten stabile und witterungsbeständige Material. Der erste Schritt zu einer nachhaltigen Konservierung unter den aktuellen Umweltbedingungen wäre deshalb eine Immunisierung gegenüber sauren Schadgasen. Die carbonatische Oberfläche sollte keine Senke für saure Luftschadstoffe sein, die zu Lasten des Originals aus der Luft herausgefiltert werden.

Aus diesem Grund konzentrierten sich die Überlegungen auf zwei Maßnahmen:

- 1) Zunächst sollte eine auf die Bedürfnisse des Baudenkmals abgestimmte Reinigungsmethode entwickelt werden, die die Besonderheiten der verwendeten Kalksteinfazies berücksichtigen sollte.
- 2) Anschließend war ein geeignetes Beschichtungssystem, ein sogenannter Porenraumschutz zu konzipieren, dem die Aufgabe zukommen sollte, die Reaktivität der Calcitoberflächen gegenüber Säuren herabzusetzen.

Da jede Reinigung meist einen Eingriff in die Originaloberfläche bedeutet und Reinigungsmaßnahmen über Erfolg und Misserfolg von Restaurierungen entscheiden, waren hohe Maßstäbe an die erste Stufe der Konzeptentwicklung anzulegen. Die Wahl des richtigen Weges zwischen konservatorischer Notwendigkeit und technischer Machbarkeit ist durchaus heikel und mit Tretminen gespickt. Denn: Krusten und Beläge müssen abgenommen werden, sobald sie eine nachweislich schädigende Wirkungen entfalten. Dafür sprechen konservatorische und ästhetische Gründe; es fragt sich nur, mit welcher Methode und bis zu welchem Grad gereinigt werden soll. Ist der Anfang erst einmal gemacht, steht man stets vor dem Dilemma, ob man sich noch auf der sicheren Seite befindet und lediglich Schmutz entfernt oder bereits die natürliche Alterungsschicht ankratzt. Im richtigen Moment auf-

hören zu können, ist aber eine Kunst, deren Beherrschung eine richtige Restaurierung und Konservierung auszeichnet.

Was den Porenraumschutz betrifft, bei dem man auf konfektionierte und hochentwickelte, organische Synthetika zurückgreifen muss, klaffen Wunsch und Wirklichkeit oftmals weit auseinander. Denn ein Material zu kreieren, das hocheffizient wie reversibel ist und gleichzeitig ewig halten soll, entspräche Zauberei. Und gäbe es einen Zauberlehrling, der so begabt wäre, ein derartiges Mittel zu entwickeln, müsste man sich trotzdem fragen, welche Geister man gerufen hat. Denn jedes noch so gute Präparat zeigt Nebenwirkungen. Es wäre schon viel gewonnen, wenn man die negativen Begleiterscheinungen auf ein Mindestmaß reduzieren und etwas über mögliche Langzeitwirkungen sagen könnte.

Kein Zweifel besteht an den Grundvoraussetzungen der Entwicklung von Konservierungsmitteln für historische Oberflächen, die unmissverständlich vorgegeben sind: Die von uns benutzte Chemie muss sich neutral verhalten, darf keine Farbveränderungen bewirken und kein beschleunigtes Wiederverschmutzen behandelter Oberflächen verursachen. Dass die gewünschte Wirksamkeit gegeben sein muss, versteht sich von selbst.

Aus den skizzierten Gründen war die Entwicklung eines kombinierten Konzeptes aus „kontrollierter Reinigung“ und „effektivem Porenraumschutz ohne negative Folgen“ die das Projekt leitende Zielvorstellung.

### *Die Reinigung*

Das Angebot an Reinigungsmethoden umfasst heute ein außerordentlich breites Spektrum, das sich von mechanischen Verfahren, wie Bürsten oder Schwämmen, über Wasser-, Partikelstrahl- und Pastenreinigungen bis hin zu Strahlverfahren mit Trockeneis und Lasern erstreckt.<sup>1</sup>

Trotz der methodischen Vielfalt kommen aufgrund der problematischen Situation an der porta praetoria nur einige wenige Verfahren ernsthaft in Betracht. So muss beispielsweise auf jede flächenhafte Reinigung mit Wasser verzichtet werden. Diese Entscheidung ist in den Risiken begründet, die sich aus einer lang anhaltenden Durchfeuchtung der teilweise chaotisch gerissenen und zerklüfteten Quader ergeben könnten. Außerdem ist der enormen Salzbelastung des Mauerwerks Rechnung zu tragen, die insbesondere an der Nordwestseite jedem aufmerksamen Beobachter ins Auge fällt: Die Belastung ist historisch begründet und auf die Nutzungs- und Restaurierungsgeschichte zurückzuführen, wobei das unverminderte Streuen von Tausalzen auf den um das Gebäude führenden Wegen nicht gerade zu einer Entlastung der Situation beiträgt.

Ein Großteil der auftretenden bauschädlichen Salze wird erst bei einer relativen Luftfeuchte unterhalb von ca. 50 % als kristalline Ausblühung offensichtlich, während die Salze ansonsten gelöst vorliegen und den Porenraum des Kalksteins über Gebühr belasten. Korrespondierend zu der feucht erscheinenden Außenseite, sind erhebliche Mengen an Effloreszenzen in dem hinter der Sichtschale liegenden Kellerraum anzutreffen, der zur Einlagerung von Kartoffeln genutzt wird. Wenn man daher eine Verschleppung der Schadstofffracht vermeiden möchte, sind Reinigungen auf wässriger Basis unter allen Umständen zu unterlassen.

<sup>1</sup> Siehe Rolf Snethlage (1997), Leitfaden zur Steinkonservierung. Fraunhofer IRB, Stuttgart.

Für das vorherrschende Schadensbild – unterschiedlich stark aufgewachsene Krusten und Beläge – sind kombinierte Reinigungsmethoden von Partikelstrahl-, Ionentauscher- und Laserverfahren prinzipiell erfolgversprechend. Im Mittelpunkt der Beprobung standen deshalb die zentralen Parameter dieser Methoden. Hierzu zählen beispielsweise der Energieeintrag (Laser), die Art des Strahlgutes sowie der Arbeitsdruck (Partikelstrahlverfahren) oder die Art und Einwirkzeit der als ein feuchter Belag aufgetragenen Opferschicht (Kompressen).

Im Falle historischer Objekte müssen die Reinigungsparameter in aller Regel durch systematisches Vorgehen am Objekt ermittelt werden. Dies ist in den Charakteristika und dem Werdegang historischer Kunst- oder Baudenkmäler begründet. Jedes Einzeldenkmal zeichnet sich durch eine individuelle Geschichte und seine ihm eigene objekt- und ortsspezifische Form der Verschmutzung aus. Problemen von Individuen ist aber nicht mit Patentrezepten beizukommen, sie bedürfen stets einer maßgeschneiderten Lösung.

Deshalb müssen sogenannte Musterfelder angelegt werden, auf denen Reinigungsparameter in systematischer Weise zu testen sind. Die erhaltenen „Muster“ zeigen verschiedene Reinigungsgrade, die vom Nulleffekt bis zur „porentief reinen“ Variante reichen können. Die Entscheidung über die Reinigungsintensität ist meist dem Auftraggeber überlassen, der nach subjektiven Kriterien entscheidet. Der Wunsch nach einem objektiven Maßstab empfiehlt die Einbindung der Naturwissenschaften, die das zerstörerische Potenzial oder die Gefahrlosigkeit einer Reinigungsmethode aufzeigen können. Im restauratorischen Alltag ist die Überprüfung von Reinigungsmethoden aus finanziellen Gründen oft nicht möglich – für hochrangige Objekte steht die Notwendigkeit einer naturwissenschaftlichen Überprüfung jedoch außer Zweifel, denn eine fehlerhafte Reinigung kann man sich aus Gründen des Unikat- und Dokumentcharakters nun einmal nicht erlauben.

### *Der Schutz des Porenraums*

Wie die Reinigung, so ist das Konzept zum Schutz des Porenraums der Substanzerhaltung und den präventiven Prinzipien der Schadensvermeidung verpflichtet. Kurzfristige Maßnahmen, deren Auswirkungen ungewiss sind und die die Gefahr der Beschleunigung korrosiver Prozesse beinhalten, müssen aus prinzipiellen Erwägungen abgelehnt werden. Die konservatorisch bevorzugten langfristigen Maßnahmen münden stets in Überlegungen zur Vorsorge und zum pfleglichen Umgang mit den uns anvertrauten Werten. Im Falle der *porta praetoria* wäre der Idealfall einer präventiven Strategie natürlich die sofortige Änderung der Umwelt- und Verkehrsbedingungen in Regensburg und der Straße „Unter den Schwibbögen“. Den Wandel einer lebhaften Metropole in eine schadstoffarme und gerontokratische Ruhezone kann aber niemand ernsthaft wollen: Baudenkmäler sind Teil der Gesellschaft und ihrer Aktivitäten und kein mumifizierter Bestand.

Blieben also Pflege- und Wartungskonzepte, die auf das aktuelle Gefahrenpotenzial reagieren und dieses zu mindern wissen. Topmodelle in der aktuellen Denkmalpflegepraxis sind Verschleißschichten auf der Basis von Kalkanstrichen oder -schlämmen oder die Applikation synthetischer Schutzschichten auf (silicium-) organischer Basis.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand deshalb die Frage, inwieweit die Reaktivität von Kalksteinoberflächen durch geeignete Schutzüberzüge herabgesetzt werden kann. Ziel der Versuche war es, die Reaktion mit sauren Luftschadstoffen –

insbesondere der Kombination aus Schwefelsäure und Kohlensäure – zu reduzieren und über die Behandlung der Oberfläche Einfluss auf die Reaktivität der Kalksteine gegenüber Säuren zu nehmen. Dabei ist insbesondere der Porenraum von Interesse, der durch den Auftrag oberflächenaktiver Substanzen (Tenside) in seinen Eigenschaften modifiziert und gegenüber Säuren passiviert werden könnte. Aggressive Lösungen sollten an der Phasengrenze frühzeitig zum Abreagieren gezwungen werden oder von dieser abprallen.

Methodisch sind diese Ziele nur durch kombinierte Schutzmittelsysteme zu erreichen. So könnte das Wasserangebot durch eine hydrophobierende Schicht reduziert werden; für eine frühzeitige Reaktion von Säuren wäre weiterhin die Zugabe von Füllstoffen wie Calciumcarbonat hilfreich und letztlich könnte mit Hilfe von Tensiden der Flüssigkeitstransport in die Tiefe des Gesteins inhibiert werden. Soweit das theoretische Modell, das hinter dem Konservierungskonzept steht. Die Nagelprobe ist letztlich die Sulfatbildungsrate, die eine Aussage über die Effektivität der Beschichtung zulässt. Aus diesem Grund wurde die Sulfatbildung zum zentralen Parameter der Laborversuche und zum Leitindikator für die Einschätzung der Wirksamkeit der Beschichtungen.

Berufsethische Gründe verbieten jeden unnötigen Versuch an einem Original. Sämtliche Vorversuche zum Porenraumschutz wurden deshalb nicht in situ am Objekt, sondern an unbewitterten Vergleichsproben im Labor (Modellversuche in vitro) absolviert. Diese Vorgehensweise hat unbestreitbare Nachteile. An der porta praetoria gibt es keine unbewitterten Oberflächen, das Gestein ist deutlich gealtert und komplex korrodiert. Eine Rekonstruktion des gewachsenen Zustandes im Labormaßstab ist jedoch völlig illusorisch. Sie übersteigt unsere Fähigkeiten, komplexe Systeme zu verstehen, geschweige denn zu simulieren. Wenn das Bauwerk aber nicht zum Versuchskaninchen degradiert werden soll, bleibt nur der mehr oder weniger unzulängliche Laborversuch.

Das Konservierungskonzept gliedert sich in drei Stufen: der Vorauswahl der Produkte, einer ausgedehnten Testreihe und dem abschließenden Feldversuch, wobei der Stufe 3, dem Versuch am Objekt, eine zentrale Bedeutung zukommt.

### *Die Festigung*

Durch das Auseinanderrücken gesteinsbildender Komponenten und die Auflösung der carbonatischen Matrix ist im Laufe der Jahrhunderte bewitterter Exposition und kriegsbedingter Schädigungen freier Porenraum entstanden, der in mürben Zonen einen nachträglichen Bindemiteleintrag erforderlich macht. Hiervon sind insbesondere die von Brandeinwirkung gezeichneten Bereiche an der Ostseite und am Torbogen der porta praetoria betroffen.

Kalksteine benötigen Festigungsmittel mit extrem breit gefächerten Eigenschaften. Eine Antwort auf die Anforderungen, die in der konservatorischen Praxis entstehen und auf ausreichende Klebekraft abzielen, sind polymere Kunstharze, wie die in der Restaurierung eingeführten Polyacrylate. Weiterentwicklungen sind Mischungen aus Polyacrylaten und Siloxanen oder reaktive Polymere aus Polyacrylaten und Polyurethanen. Die Klebekraft muss mit einem geringen Schwinden des Festigungsmittels und einer guten Anbindung an die Kristalloberflächen korreliert sein. Zudem sollte das Festigungsmittel ein gewisses Maß an Flexibilität aufweisen und die Füllung des freien Porenvolumens ermöglichen. Und Festigungsmittel sollen – dies ist die Anforderung, die gerade innerhalb eines Projektes zum Porenraumschutz

von zentraler Bedeutung ist – keiner Korrosion Vorschub leisten; sie müssen sich zumindest neutral verhalten.

Entsprechend den bisherigen Erfahrungen mit der Wirksamkeit und Nachhaltigkeit von Festigern auf Kalkstein, hat man sich im Rahmen des Projektes für Festigungssysteme auf der Basis sogenannter „elastifizierter“ Kieselgele in Kombination mit geeigneten Haftvermittlern entschieden. Die Vorzüge der flexibel eingestellten Kieselgele liegen in ihrer Eigenschaft, dünne Filme auf Calcitoberflächen auszubilden und den Porenraum hinreichend füllen zu können (festigende Wirkung). Nachteilig sind das Abfallen von Kieselgelpartikeln, wenn entsprechende Schichtstärken appliziert wurden, und die geringe Haftung des Silicats auf Calcit aufgrund der Unterschiede in der Hydrophilie von Calciumcarbonaten und Silicaten. Zur Überbrückung der eklatanten Unterschiede werden Haftvermittler auf der Grundlage von Phosphorsäureestern propagiert. Sie sollen die Adhäsion des silicatischen Festigungsmittels an den Calcitoberflächen erhöhen und den festigenden Effekt heraufsetzen. Diese Überlegungen bildeten die Grundlage für die Entscheidung, bereits bekannte oder als Versuchsprodukte vorliegende Haftvermittler mit industriell gefertigten, flexibilisierten Kieselsäureestern zu kombinieren.

Das Versuchsprogramm zur Festigung hat, ebenso wie das zum Porenraumschutz, orientierenden Charakter. Der Versuch *in vitro* kann die Situation am Objekt, der durch Brand, Gipsbildung und Salzeintrag geschädigten und belasteten Kalksteine, nur unzureichend simulieren. Auch in diesem Fall ist der Praxistest und die kontinuierliche Beobachtung der konservierenden Wirkung in den kommenden Jahren für die abschließende Bewertung des Behandlungserfolges entscheidend.

### *Die Hydrophobierung*

Zur Verringerung der Bildung von Staub- und Schadstoffdepots sowie zur Minimierung von Frostschäden, wurden ausgewählte Hydrophobierungsmittel getestet. Dabei war keine Hydrophobierung mit Tiefenwirkung vorgesehen. Statt dessen sollte wasserdampfdiffusionsoffenen Systemen der Vorzug gegeben werden. Der Zweck einer Hydrophobierung als eigenständige Maßnahmenkomponente ist die deutliche und anhaltende Reduzierung des Feuchteintrags durch Schlagregen. Bei Einbau einer mit Calcit ausgerüsteten Variante könnte das frühzeitige Abreagieren saurer Luftschadstoffe in die hydrophobierende Behandlung implementiert werden.

Die Auswahl der Wirkstoffe beschränkte sich auf handelsübliche Siliconharzdispersionen, die entsprechend der Produktangaben in den Technischen Merkblättern der Hersteller und der Erfahrungen in der Praxis über die gewünschten Eigenschaften verfügen sollten. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden eine häufig verwendete Polyacrylat- und eine Teflondispersion in die Versuche einbezogen. Auf die Applikation von reinen Kalkschlämmen oder hydraulischen Kalkschlämmen wurde verzichtet, da beide Schutzsysteme erfahrungsgemäß keinen ausreichenden Nässechutz auf exponierten Bauteilen aufweisen und eine meist zu geringe Lebensdauer besitzen.

Als erfreulichen Nebeneffekt erhoffte man sich eine deutliche Reduzierung der Bildung von Feuchtesorbatfilmen. Sie gelten als eine der wesentlichsten Ursachen für die rasche Deposition von Staub und Schadstoffen. Weiterhin fördern sie das Wachstum von Mikrobenpopulationen, die zähe Biofilme ausbilden können und die Verschmutzungsrate extrem heraufsetzen, indem polysaccharidhaltige Schleime (extrazelluläre polymere Substanzen, EPS) abgesondert werden, die Feuchte binden

und eine auffallend gute Schutzhülle für Mikroben darstellen. Mit dem Absterben der Populationen fungieren die EPS-haltigen, vegetativen Strukturen von Mikroorganismen als Kristallisationsraum für sekundäre Korrosionsprodukte. Im Falle von Kalkstein und Kalkmörteln sind dies häufig Gips, Oxalate oder Syngenit.

Ein an der porta praetoria offensichtliches Beispiel für den Mechanismus der mikrobiell unterstützten Krustengenese ist an der Nordseite des Ostturmes zu beobachten. Dort hat sich ein glatter, tiefschwarzer Belag formiert, dessen Bildung maßgeblich auf die Beteiligung von Algen und Bakterien zurückgeht. Die Stoffwechselaktivität der Mikroben sorgte für die Aufrechterhaltung eines feuchtesorbierenden Films, in den eine Vielzahl von Salzen eingebunden ist. Weder die Stoffwechselprodukte noch die Salzfracht oder der permanent hohe Feuchtegehalt sind einer Erhaltung des Kalksteins besonders zuträglich.<sup>2</sup> Aus diesem Grund und zur Unterbindung der geschilderten nachteiligen Effekte könnten hydrophobierende Beschichtungen eine wichtige Funktion in präventiven Konservierungskonzepten übernehmen – wenn die Vorteile der Behandlung ihre Nachteile aufwiegen.

## 2 Die Oberflächenreinigung

### *Was man sieht und weiß*

Im Untersuchungszeitraum von 2000 bis 2002 waren etwa 80 % des Mauerwerks der porta praetoria von einem schwarzen Belag überzogen, der sich aus Staub, Ruß und sulfathaltigen Krusten zusammensetzte. Unterbrochen wurde das monotone Schwarz und Grau von einem dicken Belag aus weißbraunem Taubenkot mit Ablaufspuren. Neben den nicht immer einfach zu erkennenden Baumaterialien (Kalkstein, Zementmörtel, Ziegel und Sandstein) verschwinden Details wie bossierte Kalksteinquader, Putzschlämme, Fugenmörtel und Anstriche unter der Kruste.

Das Alter des Belages und dessen Genese lässt sich durch die Auswertung des Archiv- und Bildmaterials und die Analyse der Krusten in etwa kalkulieren. Mit Ausnahme einiger weniger Partien an der Ostseite des Turmes, die bis zum Abriss des Sudhauses überbaut waren, ist die Verschmutzung eines Großteils der exponierten Flächen dem Zeitraum nach 1910 zuzuschreiben. Von besonderer Bedeutung ist die zu beobachtende rasche Neuverschmutzung innerhalb der letzten 40 Jahre nach der Instandsetzung von 1958.<sup>3</sup>

Die Sanierungswünsche und denkmalpflegerische Konzepte nach 1945 stellten die Betonung des Quadermauerwerks bzw. die Purifizierung des römischen Originals in den Vordergrund. Der tatsächliche Umfang der Eingriffe ist aber nur schwer abzuschätzen. Denn leider wurden die nach dem Krieg äußerst großzügig überarbeiteten Ansichten des Portals 1958 ebenso großzügig wieder re-restauriert,<sup>4</sup> so dass sich bis auf kleinere Hinweise keine eindeutigen Belege mehr finden lassen. Ein zentrales Anliegen der Maßnahmen nach 1948 muss die flächenhafte Überputzung der Ostseite gewesen sein, wogegen die Restaurierung von 1958 großen Wert auf die

<sup>2</sup> In den Krusten sind sowohl Algen als auch Pilze enthalten; der Gehalt an Calciumoxalat (mikrobielles Abbauprodukt) ist durch die Beteiligung von Oxalsäure produzierenden Mikroben überdurchschnittlich hoch.

<sup>3</sup> Archivaufnahmen des BLfD von 1971 und 1974 zeigen keine nach 1958 erfolgten Eingriffe.

<sup>4</sup> Siehe Teil A: Auswertung des Archiv- und Bildmaterials.

Freilegung und die Reinigung legte. Letzteres ist den Ausführungen Hörmanns zu entnehmen. Denn die Krusten wurden bis auf die „natürliche Patina, eine Art von Wetterkruste des Kalksteins“ abgenommen. Wie man das genau machte, ist ungeklärt. Auf jeden Fall bediente man sich „Hackerscher Steinbeize“. Die Abnahme scheint sich schwierig bis unmöglich gestaltet zu haben, was auf Fotos zu erkennen ist, die im September 1958 nach der Restaurierung angefertigt wurden.<sup>5</sup>

Die reinigende Wirkung der Beize ist im Nachhinein schwer zu rekonstruieren. Unter „Beizen“ hat man in den 1950er Jahren und in der Zeit zuvor meist alkalische Reiniger verstanden,<sup>6</sup> die auf Natronlauge („caustischer Soda“), auf Soda selbst oder Natriumsulfaten („Glaubersalz“) und Tensiden basierten und in Pastenform, als Pulver oder als Flüssigkeit aufgebracht wurden. Sie haben seit den 1930er Jahren breite Anwendung gefunden und hatten nicht selten fatale Nachwirkungen, mit denen die Denkmalpflege bis heute ihre liebe Not hat. Ein prominentes Beispiel ist der Dresdner Zwinger, dessen polychrome Ölfarbanstriche mit der berühmt berüchtigten Dresdner Zwinger Paste abgebeizt wurden, was sich bis zum heutigen Tag im Ausblühen bauschädlicher Salze auf Fugen, Gesteinsoberflächen und durchfeuchteten Gewölbeabschnitten dokumentiert.<sup>7</sup>

Das „Abbeizen“ der pechschwarzen Schicht in der Sockelzone der porta praetoria hat wohl nicht den gewünschten Erfolg gebracht. Ob nun eine Behandlung mit Beize erfolgte oder der Belag bereits als „Wetterkruste“ des Kalksteins angesehen wurde, oder ob man sich schlicht einer Ausflucht bediente, um das fleckige Aussehen nach der Reinigungsaktion zu bemänteln („*Dabei handele es sich um eine normale Kapillarzone, die wahrscheinlich durch das Spritzwasser gespeist wird. Beide Bereiche seien aber unwesentlich und nicht wert, durch kostspielige Maßnahmen behoben zu werden.*“<sup>8</sup>), darüber kann nur spekuliert werden. Es bleibt festzuhalten, dass die Restaurierung von 1958 der Reinigung breiten Raum eingeräumt hat und das Ergebnis im Hinblick auf die Kalksteine einen zwiespältigen Eindruck und erhebliche Mengen an Altlasten hinterlassen haben muss. Denn der in Teil C beschriebene hohe Gehalt an bauschädlichen Salzen kann nicht durch eine langjährige Stallnutzung oder sauren Regen alleine erklärt werden. Vielmehr deutet sehr viel auf den massiven Eintrag von Natriumverbindungen hin, was auf Streusalzen oder einer Reinigung mit caustischer Soda, Soda oder Glaubersalz beruhen kann, bei deren Reaktion mit dem Kalkstein Gips und Natriumsalze entstehen.<sup>9</sup>

Für die Bewertung der aktuellen Situation muss man sich die Fassade nach der Restaurierung 1958 als eine patinierte Ruine mit verputzten Leerstellen, weichen

<sup>5</sup> Hörmann, H. (1962) Die Instandsetzung der Porta Praetoria zu Regensburg. Der Naturstein 17: 74–75, mit vergleichenden Aufnahmen vor und nach der Restaurierung.

<sup>6</sup> Beize und beizen werden häufig als Synonyme für „Lauge“ und „stechend“ bzw. „ätzend“ verwendet; meist sind Mittel zur Oberflächenbehandlung gemeint (eigentlich Holz oder Metall), die alkalischen Laugen zum „Aufweichen von Schmutz“ gleichgesetzt werden.

<sup>7</sup> Typisches Kennzeichen sind das übermäßige Vorkommen von Thenardit (Beispiel: Dresdner Zwinger Paste, angewandt in Dresden am Zwinger, Seligenstadt am Benediktinerkloster, etc.), Natriumcarbonaten und -sulfaten (Beispiel: Scheuermittel „IMI“; angewandt in Frankfurt a. M., Dom, Skulpturengruppe des Hans Backoffen), Natriumhydroxid (gängige Abbeizmittel).

<sup>8</sup> Hörmann (1959), S. 88.

<sup>9</sup> Beispielsweise liefert die Reaktion von Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) mit caustischer Soda ( $\text{NaOH}$ ) Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) und Soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), die Produkte reagieren mit schwefelsäurehaltigen Lösungen zu Gips ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) und Natriumsulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times n \text{H}_2\text{O}$ ).

Putzübergangen und Retuschen vorstellen, deren Oberfläche so gut es eben ging gesäubert und mit einem bindemittelreichen, weichen Sumpfkalkmörtel überzogen war.

Bis in die 1970er Jahre und für die Zeit danach sind keine weiteren wirklich gravierenden Eingriffe in die Bausubstanz dokumentiert. Der Schwerpunkt der Jahre um 1970–80 lag vielmehr auf der archäologischen Grabung zur Verifizierung der Zweiturmanlage und der Fundamenttiefe.<sup>10</sup> Maßnahmen wie eine geplante Tränkung mit Kieselsäureester scheinen nicht zur Ausführung gekommen sein. Das ist zum einen aus Fotovergleichen der bereits 1970 mit Taubenkot verdreckten Fassadenabschnitte abzuleiten; zum anderen lassen sich keine Befunde an der Fassade erbringen, die auf eine Konservierung oder Restaurierung schließen lassen. Eine Ausnahme bilden singuläre Ergänzungen mit kalkspitthaltigem Kalkzementmörtel, welche die Handschrift der Dombauhütte aus der Zeit um 1980 tragen.<sup>11</sup>

### *Vorbereitung der Flächenreinigung*

#### Leitvorstellung und Konzeptentwicklung

Mit der Reinigung sollten die als substanzschädigend eingestuften Schmutzauflagen und Krusten ohne Beschädigung des Originals reduziert werden. Denn erst mit der Abnahme der Beläge wird der Zugang zu dem darunter liegenden Gestein ermöglicht, das im zweiten Schritt der Konservierung einem Porenraumschutz unterzogen werden soll. Eine Behandlung der Oberfläche ohne Reinigung wäre konservatorischer Unfug.

Vier Gründe sprechen für die Abnahme der Krusten:

- Der hohe Gehalt an organischen Fremdstoffen und Verbrennungsrückständen, der mit dem Alter der Beläge deutlich zunimmt.
- Die für den Kalkstein nachteiligen physikalischen Eigenschaften der schwarzen Krusten und gipsgestützten Beläge (thermische Belastung, Unterschiede in der mechanischen Härte von Krusten und Untergrund, Unterschiede in der Wasseraufnahme).
- Die für den Kalkstein nachteilige hohe Schadstofffracht der Beläge (Belastung mit bauschädlichen Salzen).
- Der ästhetisch unbefriedigende Eindruck und die Nivellierung der originalen römischen Epidermis.

Methodisch ist die erste Reinigungsempfehlung stufenweise erarbeitet worden. Der erste Schritt war die Vorauswahl geeigneter Reinigungsmethoden. Diese wurden in einem zweiten Schritt anhand kleinformatiger Probestellen am Objekt überprüft. Der Schwerpunkt der Vorprüfung lag dabei auf der Ermittlung geeigneter

<sup>10</sup> Siehe hierzu die sehr umfangreiche Dokumentation des BLFD aus den späten 1970er Jahren.

<sup>11</sup> Der Kalkzementmörtel um 1980 wurde von Mitarbeitern der Regensburger Dombauhütte mit Zugabe von Dolomitsplitt angemischt und für Reparaturen an den Außenskulpturen des Doms verwendet. Die angetragenen Flächen wurden anschließend auf den angrenzenden Steinon eingefärbt (Schwärzung mit organischen Stoffen) und gelegentlich mit ockerfarbenen Lösung besprengt (rudimentäre Form einer Punktretusche).

Verfahren zur Abnahme der unterschiedlich dicken Krusten. In einem dritten Schritt wurde die Praxistauglichkeit und Effektivität des besten Verfahrens am Beispiel großformatiger Arbeitsproben in situ getestet. Folgende Methoden wurden einer Vorprüfung unterzogen:

- Mikropartikelstrahlverfahren,
- Ionenaustauscherverfahren,
- Nd-YAG- Laserreinigungsverfahren,
- Kombination unterschiedlicher Verfahren.

Die Bemusterung war so angelegt, dass ein optischer Vergleich der in ihrer Intensität differenzierten Reinigungsparameter möglich war. Zur Objektivierung der empirischen Befunde diente eine naturwissenschaftliche Nachuntersuchung, die Auskunft über die Reinigungstiefe und die Auswirkung der Reinigungsverfahren auf die Kornoberflächen geben sollte. Als positiv wurde dabei jedes Reinigungsergebnis bewertet, das nicht zu einem Schaden der Calcitkristalle oder der mikritischen Matrix führte.

Für die großformatige Arbeitsprobe am Objekt kam schließlich ein Kombinationsverfahren aus Partikelstrahl- und Pastenreinigung zur Anwendung, das am Beispiel zweier Musterflächen den Praxistest zu durchlaufen hatte. Eine der Musterflächen lag auf der dem Straßenverkehr abgewandten Seite des Gebäudes (gering bewitterte und belastete Fläche), die zweite Musterfläche befand sich unmittelbar an der vielbefahrenen Straße „Unter den Schwibbögen“ und zeichnete sich durch eine tiefe Verschwärzung, mikrobiell strukturierte Krusten und eine hohe Salzbelastung aus.

#### Das Konzept der ersten Bemusterung<sup>12</sup>

Das Reinigungskonzept wurde anhand von drei Probeflächen an der porta praetoria ermittelt. Die Versuchsanordnung ermöglichte eine parallele Beurteilung der vier gewählten Verfahren. Zur besseren Unterscheidung der Ergebnisse wurden Stege nicht behandelte Oberflächen zwischen den 10 cm × 10 cm großen Feldern belassen. Für jede Methode war eine Spalte vorgesehen, in der zeilenweise drei Reinigungsgrade getestet wurden, so dass sich für jedes Probefeld eine Matrix aus vier Spalten und drei Zeilen ergab (Abb. 58).

Die erste Spalte (S1) war der Laserreinigung, Spalte S2 der Kompressenmethode, Spalte S3 dem Mikropartikelstrahlverfahren und Spalte S4 möglichen Kombinationen aus den drei Verfahren vorbehalten. Die Zeilen dienten der Definition der Reinigungsintensität. In der ersten Zeile (Z1) sollte die Kruste lediglich ausgedünnt werden. Sie entsprach demnach einem geringen Reinigungsgrad. In Zeile Z2 sollte eine deutliche Reduzierung der Kruste erfolgen (mittlerer Reinigungsgrad), während in Zeile Z3 die Kruste gänzlich zu entfernen war (hoher Reinigungsgrad). Die Spezifikation der einzelnen Reinigungsmethoden und die Lage der Probefelder sind dem Anhang zu entnehmen (Anhang D.1).

<sup>12</sup> Das Anlegen der Probefelder und die Beprobung fanden im September 2001 statt. Die Reinigung wurde einem Arbeitsteam übertragen. Das Team bestand aus den Firmen Dom-  
bauhütte Naumburg und Steinwerkstatt Regensburg.

## Erste Erkenntnisse aus der Bemusterung

### *Laserreinigung (Laser):*

Die Anwendung des Nd-YAG-Lasers alleine erbrachte kein zufriedenstellendes Ergebnis. Trotz des tiefschwarzen Untergrundes ist selbst bei hohen Energiedichten kein signifikanter Reinigungseffekt zu erzielen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um eine Verfahrensweise handelt, bei der ein Laserpunkt mäandrierend eine Fläche bearbeitet und dies folglich mit hohem Arbeits-, Zeit- und Energieeinsatz verbunden ist, sollte die Methode nur für problematische Einzelfälle zur Anwendung kommen.

### *Ionentauscher (Kompressen):*

Auch die singuläre Behandlung mit ionentauscherhaltigen Kompressen war wenig erfolgversprechend. Der zweimalige Auftrag lieferte nur bei dünnen Krusten ein positives Ergebnis. Da die Methode an Wasser als Binde- und Transportmedium gebunden ist, wässrige Verfahren an der porta praetoria aber nur in begründeten Ausnahmefällen zum Einsatz kommen sollen, wurde die Anwendung des Kompressenverfahrens alleine nicht für sinnvoll erachtet.

### *Niederdruckstrahlverfahren (Partikelstrahl):*

Das Partikelstrahlverfahren ist als alleinige Methode ebenfalls nicht geeignet, der vorliegenden Krustenproblematik mit Erfolg zu begegnen. Bei kurzer Strahlzeit wurde lediglich die äußere Schmutzhaut abgetragen. Zurück blieb eine dunkle Kruste, die mit zunehmender Strahldauer ausgedünnt werden konnte, ohne jedoch das gewünschte Reinigungsergebnis zu erreichen. Es verblieb eine braunschwarze Oberfläche, die überhaupt nur mit großem Arbeitsaufwand und einem überdurchschnittlich hohen Verbrauch an Strahlgut zu erzielen war.

### *Kombinationsverfahren (Kombination):*

Die Kombination aus Partikelstrahlverfahren und Ionentauscher erbrachte ebenso wie die aus Partikelstrahl und Laser ein gutes bis sehr gutes Ergebnis. Rezente Krusten konnten ohne Schädigung älterer Beläge abgenommen werden. Aus arbeits-technischen Gründen wurde der Kombination aus Partikelstrahl und Kompressen der Vorzug vor dem Laser gegeben (Abb. 59).

### *Der Praxistest – Musterflächen zur Reinigung am Objekt<sup>13</sup>*

Zentrale Kriterien für die Auswahl der Musterflächen waren die unterschiedlichen Typen an Krusten und Schmutzbelägen sowie die Exposition des zu beprobenden Bauteils mit der entsprechenden Feuchte- und Schadstoffbelastung des Mauerwerks.

Musterfläche 1 liegt auf der Ostseite des Gebäudes und erstreckt sich von den vorkragenden Fundamentsteinen bis zu einer Zone, die durch thermisch veränderte Quader gekennzeichnet ist. Die Ostseite kann als weitgehend trocken und geschützt gelten. Sie war bis in das frühe 20. Jahrhundert überbaut und in den 1950er

<sup>13</sup> Die Musterfelder sind im April 2002 angelegt und bis November 2003 einer begleitenden Beobachtung unterzogen worden. Ausführung: Dombauhütte Naumburg, Steinwerkstatt Regensburg.

Jahren das Ziel zweier Überarbeitungen. Heute ist sie von Staub- und Schmutzbelägen sowie rasch aufgewachsenen Krusten mit ausgeprägter Kristallbildung bestimmt.

Musterfläche 2 befindet sich auf der Nordwestseite des halbrunden Turmes. beginnt auf dem Gehwegniveau und bezieht die in das Mauerwerk eingeschlagenen Stufen der seit dem 17. Jahrhundert nachweislich vorhandenen Überbauung mit ein. Die Fläche ist durch die historische Nutzung im Umfeld hochgradig mit Schadstoffen belastet, wirkt extrem feucht und trägt eine tiefschwarze, glatte Kruste. Aufgrund der unmittelbaren Exposition an der viel befahrenen Straße (Spritzwassersituation) und der Rundung des Turmes (Verdunstungszone bei Schlagregen von Westen) ist der Feuchteintrag über das Jahresmittel überdurchschnittlich hoch.

Die Größe der Musterflächen beträgt 4,00 m × 4,00 m (Musterfläche 1) und 2,50 m × 3,50 m (Musterfläche 2). Jede Fläche hat eine exakte Trennungslinie zu den nicht gereinigten Bereichen. Methodisch war die Reinigung in folgende Arbeitsschritte untergliedert:

- a) Vorreinigung mit dem Niederdruckpartikelstrahlverfahren. Die Reinigungsintensität (Strahlzeit) wurde auf die Dicke der Kruste und den Untergrund abgestimmt.
- b) Reinigung mit Ionentauscherkompressen. Arbeitsschritt 1) und 2) wurden an ausgewählten Stellen aus Versuchszecken umgestellt.
- c) Nachreinigung mit Heißdampf zur Abnahme der Kompressenrückstände und Reaktionsprodukte.
- d) Im Falle fragiler und mürber Farb- bzw. Mörtelreste musste eine konservatorische Sicherung als flankierende Maßnahme berücksichtigt werden. Dabei kamen partielle Festigungen mit Kieselsäureethylestern oder Polyacrylaten zum Einsatz (Musterfeld 2).

### *Die naturwissenschaftliche Kontrolle*

#### Arbeitsmethode:

Zur qualitativen Bewertung der Reinigungsversuche wurden Gesteinspartikel gereinigter und ungereinigter Proben vergleichend untersucht. Wichtig war, ob sich de facto unterschiedliche Reinigungsergebnisse feststellen lassen, und wenn ja, ob ein ursächlicher Zusammenhang zur faziellen Ausbildung der Kalksteine und der Reinigungsmethode nachzuweisen ist. Zu diesem Zweck wurden Krusten und gereinigte Bereiche zunächst makroskopisch und technoskopisch analysiert, anschließend Dünnschliffe exemplarischer Proben angefertigt und die mikroskopisch erkennbaren Mikrostrukturen, der Aufbau und die Zusammensetzung der Krusten sowie die Mikromorphologien der gereinigten Bereiche mit den makroskopischen Befunden verglichen. Zusätzlich sind Gesteinsbruchstücke, die sowohl gereinigte als auch noch von einer Kruste bedeckte Partien aufwiesen, rasterelektronenmikroskopisch charakterisiert worden.

Am Beispiel zweier Probestellen der zur Ausführung gekommenen Kombinationsmethoden sei das Prinzip der naturwissenschaftlichen Kontrolle erläutert:

Probe MF2/7: Das Probefeld diente dem Test der Kombinationsreinigung, bestehend aus einer Vorreinigung mit Partikelstrahl und einer Nachreinigung mit carbonatbelegten Ionentauscherkompressen (Abb. 60).

*Kalksteintyp:* Mollusken-Echinodermen-Korallen-Grainstone.

*Krustentyp:* Dünne, schwarze, sehr unruhige Kruste, die Mörtelfragmente überzieht und Quarzeinschlüsse beinhaltet (vergipste und verschmutzte Mörtelschicht).

*Oberflächenzone des Gesteins:* Die Phasengrenze unterhalb der von einer Mörtelschicht dominierten Kruste zeichnet sich durch eine geglättete wirkende Topografie aus, die aber von kleinsten Kristalliten übersät ist.

*Fazit der Reinigung:* Das gereinigte Feld ist glatt und zeigt keinerlei farbliche Veränderungen. An den Grenzflächen von gereinigten und nicht gereinigten Bereichen sind sehr häufig mehlig Beläge anzutreffen. Diese Beläge bestehen aus carbonatischen Verbindungen in einer polymeren Matrix aus Polyurethanharz. Demnach handelt es sich um Rückstände des Kompressenmaterials mit Reaktionsprodukten. Entfernt man die mehlig Rückstände, tritt eine gereinigte Gesteinsoberfläche zutage, die glatt, ungestört und fest ist. Das eigentliche Gesteinsgefüge wird sehr gut sichtbar. Es treten weder unterschrittene Bereiche noch ausgehöhlte Kavernen oder Spuren von Mikrobeschuss (Partikelstrahl) auf.

Nach Auswertung der Befunde handelt es sich um eine die originale Oberfläche schonende Reinigung, die das primäre Mikrogefüge betont und in keiner Weise schädigt. Auf der Oberfläche befinden sich Rückstände organischer Polymere, die in Zusammenhang mit mehlig Belägen stehen. Bei der Durchführung der Maßnahme ist darauf zu achten, diese Rückstände vollständig zu entfernen, um keiner beschleunigten Neuverschmutzung Vorschub zu leisten.

*Probe MF2/8:* Das Probefeld diente einem zweiten Test der Kombinationsreinigung, die diesmal aus einer Vorreinigung mit carbonatbelegten Ionentauscherkompressen und einer Nachreinigung mit Partikelstrahl bestand (Abb. 61).

*Kalksteintyp:* Lithoklast-Pelloid-Grainstone.

*Krustentyp:* Sehr dünne, glatte Kruste, deren Wachstum auf einer sehr sauberen, inneren Kristallisationszone ansetzt. Darauf liegt eine schmutzige, pigmentierte Kruste mit deutlicher Paralleltexur und Einlagerung von Mikroorganismen (Algen).

*Oberflächenzone des Gesteins:* Die Phasengrenze erscheint glatt, stark mehlig und zeigt Spuren eines Mikroreliefs („Mikrobeschuss“) sowie eine bräunliche Veränderung des Kalksteins. Hohlräume bis 2 mm unterhalb der Oberfläche können mit Gips gefüllt sein; das Wachstum der Kristalle ist auf das Zentrum des Hohlraums ausgerichtet. Kleinere Hohlräume sind mit Gips gefüllt, große dagegen nicht (Mikro-Evaporation).

*Fazit der Reinigung:* Die gereinigte Fläche ist homogen und weist ein feinkristallines Gefüge aus Mikrit auf. Die Befunde entsprechen prinzipiell Probe MF 2/7.

Generell handelt es sich um eine relativ schonende Reinigung, die das primäre Mikrogefüge nicht schädigt. Zur Vermeidung der Entstehung eines Mikroreliefs durch das Partikelstrahlverfahren, sollte die Reihenfolge der Kombinationsreinigung umgestellt werden und der zweite Reinigungsschritt in der Anwendung des Kompressenverfahrens bestehen.

### *Ergebnisse und Empfehlungen*

Das Ergebnis der naturwissenschaftlichen Untersuchungen zur Qualitätskontrolle der Oberflächenreinigung lässt sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 62, Abb. 63):

- a) Die Ausbildung der Krusten ist vom Faziestyp des Kalksteins ebenso abhängig, wie von der Exposition, der Durchfeuchtung und dem Prozess der Mikro-Evaporation. Eine eindeutige Ansprache und Klassifikation der Krusten ist durch die Überlagerung der originären Alterungsschichten des Gesteins, welche zu wechselnden Anteilen aus Gips, Calciumcarbonat und Calciumoxalat bestehen, und den später hinzugekommenen Putzmörteln oder Schlämmen nicht immer eindeutig vorzunehmen.
- b) Kalksteine mit hohem Anteil an mikritischer Matrix (Packstones) bilden zahlreiche Risse parallel zur Gesteinsoberfläche aus. In ihnen haben sich sulfathaltige Lösungen anreichern können, was zur Ausfällung von nadeligem und faserartigem Gips führte. Die kristallographischen Achsen der Gipse sind in der Regel senkrecht zu den sie umgebenden Wandungen orientiert. Dies deutet darauf hin, dass die Risse durch Kristallisationsdruck der aus den Lösungen ausgefallenen Gipse erweitert werden. Die fein bis mittelkörnigen Faziestypen des bioklastische Kalksteins müssen demnach als weitaus empfindlicher gegenüber schadstoffreichen Lösungen angesehen werden als die sehr robusten, schlecht sortierten Grainstones.
- c) Die auf der Oberfläche aufwachsenden Gipskrusten beginnen ihr Wachstum meist auf einer dünnen, sehr sauberen kristallinen Zone aus Gips, die keine Verunreinigungen aufweist. Danach folgt die Ausbildung einer meist dicken und unregelmäßigen Kruste mit einem hohen Anteil an Fremdstoffen. In manchen Krusten werden sowohl Bruchstücke der ehemaligen Kalksteinoberfläche als auch Mörtelreste und windgetragene Partikel (Quarz, Ruß) durch Kristallwachstum transportiert. Dabei erfolgt der Transport stets von innen nach außen, was auf Lösungszufuhr hinweist und die entsprechende Wachstumsrichtung anzeigt.
- d) Fallen Gipse in abgeschlossenen Hohlräumen aus, wachsen die Kristallite zentrumsorientiert in den Hohlraum. Dabei werden kleine Hohlräume bevorzugt mit Gips gefüllt. Dies weist auf einen langsamen Prozess der Mikro-Evaporation hin, der nur in abgeschlossenen Hohlräumen eintreten kann. Die Nordseite der porta praetoria ist ein typisches Beispiel für dieses Phänomen, das den hohen Grad der Durchfeuchtung in diesem Bereich anzeigt.
- e) Ein Teil der Krusten ist glatt und dünn und zeichnet sich durch eine organogene Beteiligung aus (Algen). Diese expositionsabhängig gebildeten Beläge sind feuchtebelasteten Bauwerkabschnitten zuzuordnen, wie sie typisch für die Nordseite sind. Krusten mit einem extremen Kristallwachstum finden sich dagegen in Abschnitten mit hohen Verdunstungsraten, so an der als trocken einzustufenden Ostseite.
- f) Die Reinigungsergebnisse werden vom Faziestyp, der die Krustenentwicklung auf dem Kalkstein steuert, beeinflusst. Die überprüften Verfahren tragen in jedem Fall die oberflächlichen Areale mehr oder weniger tief ab. Dadurch verschwinden zwar die aufgewachsenen Krusten, doch weist die Oberfläche unterschiedliche Mikro-Morphologien auf. So verläuft bei Partikelstrahlverfahren der Reinigungshorizont entlang der mit Gips gefüllten, parallel zur Oberfläche orientierten Rissen, wobei es zu Unterschneidungen und stufenartigen Abbrüche dünner Kalkplättchen kommen kann.
- g) Als generell schonende Reinigungsverfahren haben sich die Kompressen- und die Kombinationsbehandlungen sowie der punktuelle Einsatz des Lasers erwiesen.

Das Partikelstrahlverfahren muss dagegen sehr dosiert zum Einsatz kommen und sollte der Behandlung mit Kompressen vorgelagert sein. Im umgekehrten Fall besteht die Gefahr einer partiellen Aufrauung der calcitischen und stellenweise hoch empfindlichen Oberfläche durch Mikrobeschuss.

- h) Die Abnahme der Krusten mit organogener Beteiligung ist ein Problemfall, nicht zuletzt, weil sich die Krusten unterhalb der biogen strukturierten Matten durch ihre mechanisch geringe Stabilität auszeichnen (weiche, morbide Konsistenz). Hier kann durch den Energieeintrag eine Durchmischung mit fein verteiltem organischen Material eintreten, was eine Verfärbung der Oberfläche nach sich zieht. An diesen Stellen muss die Reinigung äußerst zurückhaltend durchgeführt werden (Erdgeschosszone an der Nordwestseite).
- i) Reinigungen mit polymerbasierten Kompressen müssen gewissenhaft kontrolliert werden, da ein mehliges Belag aus Polymerrückständen und Reaktionsprodukten in der porenreichen Oberfläche, auf den Grenzflächen und an den Übergangszonen zurückbleiben kann. Es besteht die Gefahr, dass die thermisch empfindlich reagierenden und feuchtelabilen Pasten- und Reaktionsrückstände die Oberfläche des Kalksteins verkleben und einer schnelleren Neuverschmutzung Vorschub leisten. Um dies zu verhindern, muss gründlich nachgereinigt werden.

### 3 Versuche zur Konservierung

#### *Material und Methoden*

#### Kalksteinauswahl und Expositions-konzept

Für die Labor- und Expositionsversuche wurden gemäß der Fazieskartierung zwei Kalksteinsorten (Faziestypen) ausgewählt. Die Klassifizierung der Faziestypen und die Auswahl der für die Probenahme vorgesehenen Werksteinquader orientierte sich an den Ergebnissen der Bestandsaufnahme am Objekt. Es waren dies

*Typ A-C:* Faziestyp fein (säureempfindlicher Faziestyp mit einem hohen Anteil an mikritischer Matrix, ein sogenannter Packstone).

*Typ D/E:* Faziestyp grob (robuster, witterungsbeständiger grober Faziestyp, ein Grainstone).

Das Probematerial für den feinkörnigen Faziestyp wurde einem großformatigen, bossierten, nicht profilierten Mauerquader entnommen, der auf dem Bauhof der Stadt Regensburg aufbewahrt wird. Der Kalkstein gehört zum Bestand aus römischer Zeit, ist allerdings keinem Gebäude und Denkmal mehr zuzuordnen. Das Probematerial des groben Faziestyps stammt in Ermangelung geeigneten Vergleichsgestein aus dem Sockel der porta praetoria. Die Probenahmestelle befindet sich im Kellerraum des Gebäudes (Innenraum Ostwand).

Probengröße und Probenform waren durch die Versuchsplanung der Freilandbewitterung vorherbestimmt. Um den repräsentativen Charakter der Versuchsreihe zu wahren, kamen runde Gesteinsscheiben mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Dicke von 1,5 cm zur Beprobung. Da die Anzahl der Probekörper limitiert und eine Vielzahl an Parametern zu überprüfen waren, musste auf den aus statistischen Gründen erforderlichen drei- bis vierfachen Versuchsansatz verzichtet werden.

Zur Aufnahme und Exposition der Probekörper dienten gedoppelte Trägerplatten aus Kunststoff, in deren Deckplatte 40 kreisrunde, gegeneinander versetzte Aussparungen für die Aufnahme der Probekörper eingebracht waren. Die gereinigten und bei Raumtemperatur getrockneten Probekörper wurden in die Aussparungen eingesetzt und mit handelsüblicher Abdichtmasse aus Siliconkautschuk befestigt und seitlich abgedichtet (Abb. 64, Abb. 65).

#### *Die Auswahl der Wirkstoffe<sup>14</sup>*

Die Zusammenstellung der Wirkstoffe erfolgte gemäß der vorgegebenen Projektbeschreibung und nach Rücksprache mit dem Zentrallabor des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege. Sie lassen sich in erster Ordnung in Netzmittel (Tenside), Hydrophobierungsmittel, Haftvermittler und Festigungsmittel unterteilen.

Für die Versuchsreihe mit Tensiden wurden Produkte gewählt, die bereits zu Testzwecken in der Denkmalpflege eingesetzt worden sind oder die als vielversprechende Produkte in der industriellen Praxis Verwendung finden. Chemisch handelt es sich um langkettige Alkylaryl-Phosphorsäureester der allgemeinen Bezeichnung Nonylphenolpolyethylenglycolether oder um langkettige Alkylarylverbindungen auf der Basis von Nonylphenolpolyethoxylat sowie um ein aminstabilisiertes nichtionisches Tensid.

Als Hydrophobierungsmittel wurden einerseits industriell gefertigte, am Markt eingeführte Produkte getestet, für die Erfahrungen im Bereich der Denkmalpflege vorliegen oder die für Anwendungen in der Denkmalpflege konfektioniert wurden (Siliconharzlasuren). Es sind siliciumorganisch vergütete Copolymere mit Füllstoffen und Pigmenten auf mineralischer Basis. Eine wesentliche Komponente ist Calciumcarbonat. Aus diesem Grund sind die Lasuren opak bis undurchsichtig und haben eine helle bzw. weiße Farbe.<sup>15</sup> Ergänzend wurden chemische Fertigprodukte getestet, die als klassisch zu nennende Oberflächenbehandlungen seit langem in der restauratorischen Praxis eingesetzt werden (Polyacrylate) oder als ausgesprochen zukunftssträftig gelten (wässrige Dispersionen auf Basis von Polytetrafluorethylen, PTFE).<sup>16</sup>

Die zunächst als Haftvermittler vorgesehenen, im Rahmen der Vorversuche getesteten aminstabilisierten Phosphorsäureester aus der industriellen Praxis wurden aufgrund ihres problematischen Langzeitverhaltens ausgesondert (Verfärbung). Für die weiteren Versuche kamen drei als stabil eingestufte Produkte in Betracht. Zwei dieser Verbindungen enthalten Phosphorsäurerester als reaktive Gruppe (Phytinsäure und Dibenzylphosphat). Als weitere Verbindung wurde D,L-Weinsäure in die Versuchsreihe einbezogen, der als organischer Säure mit mehreren Carboxylgruppen vielversprechende Eigenschaften hinsichtlich der Verbesserung der möglichen Adhäsion von Festigungsmitteln zugeschrieben werden.

<sup>14</sup> Eine tabellarische Zusammenstellung der verwendeten Wirkstoffe ist im Anhang enthalten (Anhang D.2).

<sup>15</sup> Der Unterschied zwischen den Lasuren liegt in dem Feinsandanteil der sogenannten Schlämmlasur, die als Anstrich gedacht ist. Die vom Hersteller angegebenen Werte für die Wasserdampfdurchlässigkeit unterscheiden sich nur geringfügig. (Historic-Lasur und Historic-Schlämmlasur; Technisches Merkblatt, Fa. Remmers Chemie Lönigen).

<sup>16</sup> Das Polyacrylat ist Paraloid B72, das als Terpolymer aus PMMA und PEMA gilt. Polytetrafluorethylen-Dispersionen sind als 60%ige wässrige Lösungen im Handel erhältlich (Fa. Aldrich).

Die Auswahl der Festigungsmittel beschränkte sich auf handelsübliche siliciumorganische Verbindungen. Kieselsäureethylester und ihre elastifizierten Modifikationen sind seit den 1960er Jahren in der Denkmalpflege in Gebrauch oder wurden speziell für Belange der Denkmalpflege modifiziert. Die Unterschiede der getesteten Typen sind in den Anteilen an vorhydrolysierten Wirkstoffkomponenten begründet. Ein erst seit kurzem auf dem Markt befindliches Produkt ist zusätzlich mit elastifizierenden Komponenten unbekannter Zusammensetzung ausgestattet.<sup>17</sup>

Aufgrund der erstaunlichen chemischen Beständigkeit von Kalksteinen mit historisch gewachsenen Calciumoxalatschichten, wurde eine ergänzende Versuchsreihe mit Oxalsäure durchgeführt. Oxalatkrusten bzw. -beläge können eine passivierende, einer Verschleißschicht gleichkommende Funktion übernehmen. Eine erste Aussage zur Wirksamkeit dieser alternativen Behandlung erschien sinnvoll.

### Vorbereitung des Versuchsprogramms

Das Versuchsprogramm unterteilte sich in

- a) orientierende Vorversuche zur Vorauswahl geeigneter Produkte,
- b) systematische Laborversuche zur vergleichenden Untersuchung der Wirkstoffe und ihrer Kombinationen, und
- c) die Bemusterung am Objekt, in der die in den Laborversuchen als „gut“ klassifizierten Beschichtungssysteme einer Feldstudie unterzogen wurden.

Nach der Vorauswahl der Schutzmittel, der Selektion der Wirkstoffe oder Wirkstoffkombinationen und der Auswertung der Ergebnisse im Abschluss an die Bemusterung am Objekt, konnte eine erste Empfehlung für das restauratorische Vorgehen zur Konservierung des Kalksteinbestandes formuliert werden.

### Orientierende Vorversuche

#### *Das Verhalten der reinen Wirkstoffe*

Zunächst wurde die chemische Stabilität der für eine Verwendung in Frage kommenden Reinsubstanzen und das der verwendeten Chargen kritisch untersucht. Der Schwerpunkt der Vorprüfung lag auf der Überprüfung der mittelfristigen Stabilität der technischen Reinprodukte; grundsätzlich instabile Verbindungen waren prinzipiell auszusondern.

Die Vorversuche beinhalteten die Applikation der Wirkstoffe auf Probekörper und deren dreimonatige Exposition im Freien. Parallel wurden exemplarische Chargen der Produkte (Rückstellproben) abgefüllt bzw. auf Glasträgern ausgestrichen und im Labor bei Raumtemperatur an einem neutralen Ort (keine Sonneneinstrahlung) 12 Monate aufbewahrt. Im Anschluss daran wurde die zeitabhängige Änderung der Substanzen hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften evaluiert. Grundlage der Bewertung waren folgende Kriterien:

- (0) keine Veränderung.
- (1) optische Aufhellung.
- (2) optische Abdunkelung.
- (3) Farbtonänderung (Verbräunung).

<sup>17</sup> Funcosil-Typen der Firma Remmers, Löningen (Funcosil 300, 500 S und 500 STE).

- (4) Nebenreaktionen (Trübung).
- (5) Chemischer Abbau: ja / nein / nicht zu detektieren.

Das Ergebnis war, dass handelsübliche Polysulfonsäurederivate und aminstabilisierte Phosphorsäureester aufgrund ihrer farblichen und substanziiellen Veränderung ausgeschieden wurden (Vergilbung, Verbräunung, Ausflocken).

Die zur Anwendung gekommenen Schutzmittel sind Tab. 5 zu entnehmen. Unter der Rubrik „Applikationsform“ sind die tatsächlich applizierten Konzentrationen und die Art des Auftrags zusammengefasst.

### *Beschichtung der Probescheiben und Belegungsplan*

Nach dem Bestücken der Trägerplatten aus Kunststoff mit jeweils 40 gleich behandelten Probescheiben wurden diese gemäß dem folgendem Schema behandelt:

- a) Die Probescheiben *Nr. 01 bis 07* tragen die Reinsubstanzen der Tenside und Hydrophobierungsmittel.
- b) Die Probescheiben *Nr. 08 bis 19* wurden mit Kombinationen der Tenside und Hydrophobierungsmittel beschichtet.<sup>18</sup>
- c) Die Probescheiben *Nr. 20 bis 25* tragen die Reinsubstanzen der Haftvermittler und Festigungsmittel.
- d) Die Probescheibe *Nr. 26* wurde in Stufen mit Oxalsäure behandelt.
- e) Die Probescheiben *Nr. 27 bis 38* wurden mit Kombinationen der Haftvermittler, der Festigungsmittel und Oxalsäure beschichtet.<sup>19</sup>
- f) Die Probescheiben *Nr. 39 bis 40* sind unbehandelte Referenzproben der jeweiligen Kalksteinfazies.

Über die Wirkstoffkombinationen auf den jeweils 40 Probescheiben aus Kalkstein (Faziestyp fein, Faziestyp grob) gibt der Belegungsplan im Anhang zu diesem Kapitel Auskunft (Anhang D. 3).

### *Versuchsreihe zur Vorkorrosion – Behandlung mit Säurelösung<sup>20</sup>*

Zur Vorbereitung der Bemusterung am Objekt und zur Eingrenzung der Auswahl an Beschichtungssystemen, musste eine Vorauswahl getroffen werden. Sie basierte auf einer Schnellwitterung der Beschichtungen mit Säurelösung (Vorkorrosion), dem je eine Hälfte der beschichteten Probekörper unterzogen wurde. Der Laborversuch sollte eine erste Aussage über die potenzielle Schutzwirkung der Behandlungen gegenüber saurem Angriff liefern.

Die Zusammensetzung der Säurelösung richtete sich nach den in der Umwelt diagnostizierten, für korrosive Einflüsse als maßgeblich erachteten Säuren: Aus diesem Grunde kam eine Mischung aus Kohlensäure und Schwefelsäure bei einem pH 3,00 zum Einsatz.

<sup>18</sup> Die Hydrophobierung erfolgte eine Woche nach dem Auftragen der Tenside.

<sup>19</sup> Die Applikation des Festigungsmittels erfolgte eine Woche nach dem Auftragen der Haftvermittler. Vor der Exposition wurde die Reaktionszeit der Festigungsmittel abgewartet (Kontrolle durch Rückstellproben; gravimetrische Bestimmung der Trocknungskurve).

<sup>20</sup> Die Analysenparameter sind in Anhang D. 4 zusammengestellt.

Zur Bewertung der Schutzwirkung wurde im Anschluss an die Säurebehandlung ein Ausschnitt der vorkorrodierten Oberfläche hinsichtlich der Korrosionsprodukte analysiert. Hierfür wurde an der Grenzfläche die Sulfatbildungsrate anhand des Gehaltes an leichtlöslichen Sulfaten in Schabeproben bestimmt und mit denen von unbeschichteten, aber mit Säure behandelten Referenzen verglichen.

Die Sulfatbildung als Funktion des Beschichtungssystems kann zur Qualitätskontrolle der Wirksamkeit einer Beschichtung nur herangezogen werden, wenn man davon ausgeht, dass die Schutzwirkung mit abnehmendem Sulfatgehalt zunimmt. Auf dieser Grundlage wurden folgende Klassifikationen eingeführt:

1. Als *potenziell schützend* galten Beschichtungen, deren Sulfatgehalt geringer als in den Referenzproben war.
2. Als *neutral* wurden Beschichtungen eingestuft, die annähernd gleiche Sulfatgehalte wie in den Referenzen aufwiesen.
3. *Potenziell schädigende* Beschichtungen waren Systeme, die zu Sulfatgehalten deutlich über denen der Referenzen führten.

### Erste Ergebnisse – Zusammenstellung der Beschichtungssysteme

Nach der Behandlung mit der sauren Reaktionslösung ergaben sich signifikante Unterschiede in den Sulfatbildungsraten. Nicht beschichtete Referenzproben hatten eine Sulfatbildungsrate von etwa 0,025 Ma.-%, die als Referenzwert zur Beurteilung der Schutzwirkung herangezogen wurden. Anhand dieses Wertes ist eine Rankingliste von „potenziell schützenden“, „neutralen“ und „potenziell schädigenden“ Wirkstoffen bzw. Kombinationen aufgestellt worden.

So konnte die kombinierte Beschichtung der Kalksteine mit Tensiden und einem nachfolgend applizierten Hydrophobierungsmittel als prinzipiell schützend für den carbonatischen Porenraum klassifiziert werden. Die günstigsten Resultate ergaben sich für eine Kombination aus einem Tensid mit einer Siliconharzlasur. Anzumerken ist die gute Schutzwirkung des in dieser Kombination getesteten nichtionischen Tensids, das eine *potenziell schützende* Wirkung entfaltete. Die Kombinationen der anderen Hydrophobierungsmittel mit Tensiden fielen in den *neutralen* Bereich; zumindest waren keine auffallend negativen Auswirkungen festzustellen.

Festigungsmittel und kombinierte Systeme aus Haftvermittlern und Festigern schnitten bei der Säurekorrosion erwartungsgemäß nicht allzu vorteilhaft ab. Dies ist nicht verwunderlich, da eine Festigung in der Regel eine Maßnahme mit einer klaren Vorgabe und Zielsetzung ist, nämlich der Konsolidierung einer durch Witterungseinflüsse an Bindemittel verarmten Gesteinsstruktur. Deshalb ist die Festigung als ein Arbeitsschritt zu sehen, der dem Porenraumschutz vorausgehen und diesen unterstützen soll. Festigungsmittel sollten jedoch keine Quelle für die Beschleunigung korrosiver Angriffe sein. Daher geben die nach der Säurebehandlung auftretenden (hohen) Sulfatbildungsraten bei Kalksteinproben, auf denen Haftvermittler und Festiger appliziert worden waren, Anlass, kritisch über die Anwendung nachzudenken.

Umso erfreulicher waren die Resultate mit vorhydrolysierten und elastifizierten Kieselsäureestern, die unter Berücksichtigung der im Rahmen der Versuchsreihe nicht gesicherten statistischen Bewertung, dem neutralen Bereich zugerechnet werden konnten. Das Gesagte gilt insbesondere für die Kombination von Festigern und Dibenzylphosphat als Haftvermittler, die im Vergleich zu den Reinsubstanzen zu einer erheblichen Reduzierung der Sulfatbildungsrate führte.

Als potenziell schädigend mussten Behandlungen mit Phytin- und Weinsäure und sämtliche darauf aufbauenden Beschichtungen eingestuft werden. Im direkten Vergleich mit unbehandelten Referenzen lagen die Sulfatbildungsraten um den Faktor 5 höher.

Auffallend sind die extrem schlechten Resultate mit Weinsäure als haftvermittelnder Substanz. Eine mögliche Erklärung ist, dass Weinsäure und ihre Calciumsalze in Kontakt mit schwefelsäurehaltigen Lösungen von geringer chemischer Stabilität sind und unter Bildung von Sulfaten zersetzt werden. Dieser Befund steht im Gegensatz zu den Ergebnissen mit Oxalsäure, deren Calciumsalze eine um Größenordnungen bessere Stabilität gegenüber schwefelsauren Lösungen aufweisen. In Kombination mit Dibenzylphosphat entspricht die Sulfatbildungsrate des Kombinationssystems sogar den Referenzproben (neutral).

Die erzielten Ergebnisse ergaben eine Rankingliste, die – nach zunehmenden Sulfatgehalten geordnet – die Grundlage für die Bemusterung am Objekt bildete, für die nur potenziell schützende oder neutral eingestufte Beschichtungen zum Einsatz kamen (Abb. 66).

### *Expositionsversuche (Langzeitkorrosion)*

#### Versuchsablauf und Bewertungskriterien<sup>21</sup>

Die mit den Probekörpern bestückten und beschichteten Trägerplatten wurden über einen Zeitraum von sechs Monaten im Freien exponiert (Langzeitkorrosion). Zur Bewertung der Wirksamkeit der Beschichtungssysteme gegenüber atmosphärischem Angriff ist

1. eine *makroskopische Beurteilung* der Probeflächen vorgenommen worden, aus der auf das Alterungsverhalten und die Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Beschichtungen (Farbtonänderung, Trübung, Aufhellung) geschlossen wurde. Die makroskopische Untersuchung wurde durch eine *Farbwertbestimmung* ergänzt und auf eine objektive Grundlage gestellt (Ermittlung der L/a/b- Werte).<sup>22</sup>
2. Der optischen Untersuchung schloss sich die Bestimmung der *Sulfatbildungsrate* an. Anhand ausgewählter Beispiele wurde außerdem der Unterschied zwischen vorkorrodierten und nicht vorkorrodierten Probeflächen hinsichtlich der Sulfatbildung mit dem Ziel analysiert, Hinweise auf die Nachhaltigkeit der Maßnahmen zu erhalten.

Anschließend ist wiederum eine Rankingliste aufgestellt worden, die für eine Beurteilung der Denkmalwürdigkeit der Schutzsysteme herangezogen wurde. Entscheidungskriterien waren die Schutzwirkung auf der Grundlage der Sulfatbildungsrate sowie das Langzeitverhalten der Beschichtungen. Die Bewertung basierte auf zwei Annahmen:

- a) Die Schutzwirkung ist umso größer, je geringer der Sulfatgehalt an der Grenzfläche ist.
- b) Eine Eignung der Beschichtung für Denkmaloberflächen ist umso eher gegeben, je geringer die optische Veränderung und Neuverschmutzung der Oberfläche ist.

<sup>21</sup> Die Analysenparameter sind in Anhang D. 4 zusammengestellt.

<sup>22</sup> Cielab-System.

Zur Klassifizierung der Wirksamkeit der Beschichtungen galt der bereits genannte Kriterienkatalog. Für die Beurteilung der optischen Veränderungen musste ein zweiter Katalog aufgestellt werden, wobei sich die Evaluation auf Veränderungen gegenüber dem nicht bewitterten Ausgangszustand und den gleichzeitig bewitterten Referenzproben bezog. Folgende Klassifizierung war die Grundlage der Bewertung:

- (0) *Der Farbwert L* der exponierten Probe entspricht dem Ausgangszustand. Es sind keine Veränderungen festzustellen (keinerlei Auffälligkeiten).
- (1) *Der Farbwert L* der exponierten Probe entspricht dem der Referenzprobe in der Versuchsreihe (keine außergewöhnlichen Veränderungen).
- (2) *Der Farbwert L* entspricht nicht dem Ausgangszustand bzw. der Referenzprobe. Es ist eine optische Aufhellung wahrzunehmen (Veränderung der Beschichtung: Aufhellung).
- (3) *Der Farbwert L* entspricht nicht dem Ausgangszustand bzw. der Referenzprobe. Es ist eine optische Abdunkelung wahrzunehmen (Veränderung der Beschichtung: Abdunkelung).
- (4) *Der Farbton* entspricht nicht dem Ausgangszustand bzw. der Referenzprobe. Es ist eine Farbtonverschiebung zu größeren oder kleineren *b*-Werten zu registrieren (Veränderung der Beschichtung: Abweichung vom *b*-Wert).

### Ergebnisse der Expositionsversuche<sup>25</sup>

#### *Sulfatbildungsrate:*

Nach sechs Monaten freier Bewitterung war für die Schutzwirkung der Beschichtungssysteme gegenüber den geringen, aber messbaren Konzentrationen an schwefelsauren Luftverunreinigungen in der Umwelt (Expositionsstandort: Nürnberg, Stadtmitte) zu konstatieren, dass die Sulfatbildungsrate relativ unabhängig vom Faziestyp ist und in einer vergleichbaren Größenordnung liegt. In der für denkmalpflegerische Zeiträume kurzen Expositionszeit sind keine signifikanten, auf das Substrat zurückgehenden Unterschiede nachzuweisen. Diese Feststellung ist durchaus von Bedeutung, denn andernfalls wäre man gezwungen, für jeden Stein eine individuelle Behandlung vorzusehen. Dennoch waren feine Unterschiede zu registrieren (Abb. 67).

- a) So ist die Haltbarkeit der Hydrophobierungen auf Faziestyp B (grob) anders als auf Faziestyp A (fein). Besonders auffallend ist der Zustand der PTFE-Beschichtungen, die bei der groben Varietät gut erhalten und als grauer Film erkennbar blieben, während sie sich auf der feinen Varietät nach kurzer Zeit verloren. Bei Faziestyp A (fein) verschwand die Schutzwirkung der Tenside nach einer sehr kurzen Zeitspanne, während ihre Wirksamkeit bei der groben Varietät über einen deutlich längeren Zeitraum erhalten blieb. Die Unterschiede sind auf die Porenräume der Kalksteinfaziestypen zurückzuführen.
- b) Nimmt man die Mittelwerte beider Faziestypen als Beurteilungsgrundlage, bleibt festzuhalten, dass kombinierte Schutzsysteme aus einem Tensid und einer Silikonharzlasur mit silicatischen und carbonatischen Füllstoffen (Schlammiasur) eine geringere Sulfatbildungsrate als die Referenzen aufwiesen und als potenziell schützend eingestuft werden konnten. Dieses erfreuliche Ergebnis war von der

<sup>25</sup> Die Analysenparameter sind in Anhang D. 4 zusammengestellt.

Wahl des Tensids weitgehend unabhängig; es beruhte auf der an sich vortrefflichen Witterungsbeständigkeit der Lasur. Eine Gruppe von Tensiden scheint besonders geeignet für eine Vorbehandlung zu sein: Die günstigsten Resultate ergaben sich für die Klasse der Nonylphenolpolyethylenglycolether.

- c) Die Wirksamkeit von Tensiden ohne nachgeschaltete Hydrophobierung ist zeitlich begrenzt. Dies bedeutet, dass eine reine Tensidbehandlung für exponierte oder feuchtebelastete Bauteile aufgrund der geringen Langzeitbeständigkeit der Netzmittel nicht weiter erwogen werden sollte. Ebenso sind Überzüge auf der Basis von Tensiden in der Kombination mit Polyacrylat und PTFE nicht sonderlich von unbehandelten Referenzen zu unterscheiden. Die Sulfatbildung lag nur geringfügig oberhalb der Referenzen, weshalb man den Beschichtungssystemen zumindest ein neutrales Verhalten attestieren kann.
- d) Auch nach der Freilandbewitterung lieferten Kombinationen aus vorhydrolysierten und elastifizierten Kieselsäureestern mit Dibenzylphosphat als Haftvermittler erstaunlich gute Resultate. Den getesteten Systemen kann eine neutrale bis potenziell schützende Wirkung zugeschrieben werden.

### *Farbwertbestimmung*

Die Expositionsversuche führten zu teilweise drastischen Unterschieden der Beschichtungen hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität, die sich insbesondere anhand der L-Werte (Helligkeit) und der positiven b- Werte (gelbe Farbachse) im  $L^* a^* b^*$ -Farbenraum festmachen lassen.

Generell lagen die Helligkeiten der Proben auf einer Skala von 0 (schwarz) bis 100 (weiß) bei Werten zwischen 60 bis 80 (Abb. 68). Die Farbwerte sind im gelb-roten Farbraum positioniert (positive a- und b-Werte), wobei die markantesten Unterschiede die Verschiebung in den gelblichen Farbraum betreffen (zunehmende a- Werte; Abb. 69).

- a) Betrachtet man die zeitliche Änderung der Referenzproben, so fällt auf, dass der Faziestyp A (fein) mit zunehmender Bewitterung zum Aufhellen neigt, während der Faziestyp B (grob) zum Abdunkeln tendiert. Anders verhält es sich mit den Beschichtungen. So war für
- b) Faziestyp A (fein) mit zunehmender Bewitterung eine Tendenz zum Abdunkeln der Oberflächen im Vergleich zu den Referenzen festzustellen (dies bedeutet, dass behandelte Proben nachdunkeln). Ausnahmen bildeten lediglich Beschichtungen, die mit Kieselsäureester, Oxalsäure oder Weinsäure kombiniert waren. Kieselsäureester und organische Säuren haben einen deutlich kompensatorischen Effekt. Mit der Abnahme der Helligkeit war eine Zunahme gelber Farbwerte verbunden (zunehmende a-Werte).
- c) Für Faziestyp B (grob) war hingegen im Vergleich zu den Referenzen eine tendenzielle Aufhellung zu registrieren, die mit einer Abnahme der b- Werte korreliert ist.
- d) Nimmt man den L-Wert als Richtschnur, fällt auf, dass eine Reihe von Beschichtungen eine Abdunkelung der Oberfläche bewirken. Insbesondere betraf das Gesagte das getestete Polyacrylat und dessen Kombinationen, die bei beiden Faziestypen durchweg dunkler als die Referenzen erschienen. Das Gleiche gilt in abgeschwächter Form für Kombinationen mit der Schlämmlasur. Auch Kom-

binationen mit PTFE führten bei beiden Faziestypen zu einer generellen Abdunkelung.

- e) Ein unterschiedliches Verhalten ist für die Siliconharzlasuren festzustellen. Während bei Faziestyp A (fein) die L-Werte unterhalb der Referenzen lagen (Abdunkelung), war bei dem Faziestyp B (grob) eine Aufhellung zu messen. Im unmittelbaren Vergleich mit der abdunkelnden Wirkung, die das Polyacrylat oder die Schlämmlasur erzeugten, sind die optischen Beeinträchtigung aber durchweg als gering einzustufen.
- f) Systeme mit Dibenzylphosphat zeigten übereinstimmend ein neutrales Verhalten. Für die Kieselsäureester sind bei Faziestyp B (grob) Aufhellungen die Regel. Anzumerken bleibt ein zunehmendes Abdunkeln mit steigendem Hydrolysegrad.
- g) Parallel zu den L- Werten änderten sich die b- Werte in charakteristischer Weise. So sind die Farbtonwerte bei der feinen Fazies im Vergleich zu den Referenzproben deutlich zu höheren, bei der groben Fazies zu niedrigeren Werten verschoben. Beispielsweise zeichneten sich Beschichtungen mit Polyacrylat durch ein Ansteigen des b-Wertes aus.
- h) Komplex verhalten sich Schutzmittelsysteme mit Weinsäure, der Funcosil Lasur und Dibenzylphosphat. Auffallend ist, dass bei beiden Fazies in Anwesenheit von Weinsäure der b-Wert drastisch reduziert wurde.
- i) Die reinen Tenside ließen sich keiner einheitlichen Tendenz zuordnen. Allerdings überwog eine in den gelben Farbraum verschobene Intensivierung des Farbtons.

### *Wirkstoffkombinationen und Musterfelder im Praxistest*

#### Optimierung der Wirkstoffkombinationen

Auf der Grundlage der Laborergebnisse und der experimentellen Daten nach der Freilandbewitterung wurden die wirksamsten und optisch am wenigsten veränderten Schutzsysteme für eine Bemusterung am Objekt zusammengestellt. Die guten Resultate der Kombinationen von Tensiden mit Siliconharzlasuren, die sich sowohl durch eine deutliche Schutzwirkung als auch durch geringe Nebeneffekte auszeichneten, waren der Anlass, sich bevorzugt mit diesen Systemvarianten zu befassen und sie für einen Einsatz am Objekt vorzubereiten.

Generelle Probleme bei der Anwendung industrieller Produkte in der Denkmalpflege haben auch bei den Versuchen zur Kalksteinkonservierung an der porta praetoria durchgeschlagen. Sie lassen sich unter den Schlagworten „Produktkonstanz“ und „Verlässlichkeit“ zusammenfassen. Dazu muss man wissen, dass die Produktpalette der Hersteller strikt am Markt orientiert ist und nur für begrenzte Zeit Gültigkeit besitzt. Was heute als Topchemikalie angeboten wird, kann morgen bereits aus den Regalen verschwunden sein. Der rasche Wechsel macht weder vor Produkten, Produktlinien noch (Produkt-) Managern halt. Der Wunsch nach einer optimalen Chemikalie, die nach gründlichen Studien und einem positiven Testlauf am Original verwendet werden darf und auch morgen noch erhältlich ist, scheidet häufig an der Wirklichkeit. Denn chemische Erzeugnisse sind keine Spielwiese für die Restaurierung und Denkmalpflege, auf der man sich bewegen und bedienen kann, wie man möchte – eher ist es umgekehrt.

So musste das in den bisherigen Testreihen als „sehr gut“ evaluierte, nichtionische Tensid (ein Nonylphenolpolyethoxylat; die genauere Spezifikation unterliegt dem Patentschutz und ist Firmengeheimnis) durch ein anderes, wenig getestetes Produkt ersetzt werden. Der Grund war die Einstellung der Produktion des Tensids wegen möglicher gesundheitlicher Schäden im März 2003.

Eine weitere Änderung betraf die als zu dicht und farbintensiv empfundenen Siliconharzlasuren, die an denkmalpflegerische Belange angepasst werden mussten. Die Applikationsform der Reinsubstanzen wurde geändert, wobei zwei Verdünnungsstufen mit den Mischungsverhältnis 1:10 und 1:20 zur Anwendung kamen. Nach dem Auftragen auf Probekörper der beiden Kalksteinfazies waren keine gravierenden optischen Beeinträchtigungen mehr gegeben, so dass der Laborversuch ein zufriedenstellendes Resultat lieferte. Ob durch die Verdünnung des Wirkstoffs der gewünschte konservierende Effekt allerdings noch gewährleistet war, musste durch ergänzende Korrosions- und Bewitterungsversuche ermittelt werden.

Insgesamt wurden elf Wirkstoffe und ihre Kombinationen zunächst dem Vortest (Säurekorrosion) und anschließend einer Testphase unterzogen, in der die Probekörper sechs Monate lang einer Freilandbewitterung ausgesetzt waren (Tab. 6). Das Ergebnis der Auswertung im Anschluss an die Säurebehandlung und Exposition war, dass für eine messbare Schutzwirkung die Verdünnung der Siliconharzlasuren 1:10 nicht übersteigen darf. Die Kombination mit Tensiden aus der Klasse der Nonylphenolpolyethoxylate wurde als „sehr gut“ klassifiziert (Abb. 70).

### Musterfelder am Objekt

Die positiv evaluierten Wirkstoffe und Kombinationen wurden schließlich dem Praxistest an der porta praetoria unterzogen. Hierfür wurden mehrere kleinformatige Musterflächen zur Konservierung (MK) am Objekt angelegt und in sogenannten Musterfeldern zusammengefasst. Die gewählten Fassadenabschnitte unterscheiden sich hinsichtlich ihres Verwitterungsgrades und ihrer Vorbehandlung.

Ein Musterfeld ist als Referenz in keiner Weise vorbehandelt (MK1). Die ausgewählte Kalksteinoberfläche gehört zum Faziestyp A (fein), ist sauber und befindet sich auf der Westseite des Turmes. Ein weiteres Musterfeld liegt an der Nordseite innerhalb der Musterfläche zur Oberflächenreinigung. Der Kalkstein ist ein als schwierig eingestufter Packstone mit einer problematischen, weil hochgradig salzbelasteten und durch eine organogene Kruste vorgeschädigten Oberfläche (MK2). Ein drittes Musterfeld befindet sich auf der wenig bewitterten und trockenen Ostseite des Gebäudes innerhalb der Musterfläche zur Oberflächenreinigung. Der Kalkstein ist ein robuster Grainstone mit einer als normal einzustufenden Gipskruste (MK3). Das vierte Musterfeld (MK4) ist das Pendant zu Musterfeld MK1 und liegt diesem gegenüber auf der Nordseite der porta praetoria. Ihr besonderes Kennzeichen ist die thermisch veränderte Oberfläche des Gesteins (rötliche Verfärbung) bei einer ansonsten sauberen und glatten Topografie.

Die Musterfelder lassen sich wie folgt charakterisieren (Abb. 71).

- a) *Musterfeld MK1* (Westseite der porta praetoria). Die Musterflächen zeichnen sich durch eine saubere, glatte und nicht gereinigte Oberfläche aus. Die Größe der elf Einzelflächen beträgt jeweils 5 cm × 15 cm.
- b) *Musterfeld MK2* (Nordseite innerhalb der Musterfläche zur Oberflächenreinigung) setzt sich aus mehreren Einzelflächen zusammen:

*Musterfeld MK2a* umfasst elf Einzelflächen mit jeweils 8 cm × 25 cm.

Die *Musterfelder MK2b und MK2c* sind etwas größer angelegte Einzelflächen (20 cm × 20 cm) in unmittelbarer Nachbarschaft zu MK2a. Sie sollen die Übertragbarkeit der vielversprechendsten Wirkstoffkombinationen auf einem größeren Fassadenausschnitt demonstrieren.

- c) *Musterfeld MK3* (Ostseite des Turmes, innerhalb der Musterfläche zur Oberflächenreinigung). Die Größe und Anlage der Einzelflächen sowie die Abfolge der getesteten Wirkstoffkombinationen entspricht MK2a.
- d) *Musterfeld MK4* (Nordseite der porta praetoria). Die Anzahl und Größe der Einzelflächen sowie die Abfolge der Wirkstoffkombinationen entsprechen MK1 (elf Flächen mit jeweils 5 cm × 15 cm).

#### 4 Schlussfolgerungen

##### *Erstes Fazit der Reinigungsergebnisse*

Das mit Hilfe der Vorprüfung ermittelte Reinigungskonzept ist auf die großformatigen Musterfelder übertragbar. Der Reinigungsgrad entspricht den Zielvorstellungen und der konservatorischen Notwendigkeit der Krustenabnahme und Schadstoffreduzierung. Historische Befunde der mittelalterlichen Geschichte des Bauwerkes, die noch verbliebenen Spuren der Überbauung der Ostseite aus den Jahren bis 1912 und die Mörtelbefunde haben sich ebenso wie die wenigen authentischen Dokumente aus der Zeit nach der Wiederaufdeckung der porta praetoria erhalten lassen (siehe Abb. 62, 63).

Der Aufbau und die Zusammensetzung der Krusten und der Schwierigkeitsgrad ihrer Abnahme wird von der Kalksteinfazies, der Exposition des Bauwerks im städtischen Raum und dem Gehalt an Schadstoffen in der aus Kalkstein, Mörteln und Korrosionsschichten bestehenden Grenzfläche bestimmt. Bei einer flexiblen Handhabung des getesteten Reinigungskonzeptes mit einer dosierten und auf den vorliegenden Bestand angepassten Anwendung des kombinierten Partikelstrahl- und Kompressenverfahrens ist eine erfolgreiche Abnahme des schadstoffhaltigen, substanzgefährdenden und ästhetisch unbefriedigenden schwarzen Belages möglich, ohne dass die Authentizität des Bauwerkes beeinträchtigt wird. Abgenommen werden lediglich die durch die Freistellung der porta praetoria in den Jahren nach 1885 aufgewachsenen sekundären Krusten – soweit sie nach der Reinigung von 1958 noch verblieben sind – sowie die rezenten Schmutzbeläge aus den Jahren nach 1958. Ältere Beläge und Korrosionsschichten, welche die Patina und die Authentizität des Gebäudes letztendlich definieren, werden nicht in Mitleidenschaft gezogen (Abb. 72, Abb. 73).

Da sich im bisherigen Beobachtungszeitraum (Mai 2002 bis November 2003) keine optisch nachweisbaren Neuverschmutzungen haben erkennen lassen, bestehen aus konservatorischer Sicht keine Bedenken gegen eine Reinigung der Toranlage mit Hilfe der Kombinationsmethode. Denn selbst ohne jede weitere Maßnahmen würde die Reinigung alleine bereits eine deutliche Verbesserung des bisherigen Zustandes zur Folge haben, da sie zu einer signifikanten Reduzierung der Schadstoffbelastung und der physikalischen Beeinträchtigung des Kalksteins und zur Erhaltung des römischen Originals bei der aktuellen Umwelt und Schadstoffsituation in der Innenstadt von Regensburg beitragen.

Nach der Reinigung wird ein sichtlich gealtertes römisches Mauerwerks mit einer Vielzahl an Durchbrüchen und mittelalterlichen Veränderungen zu sehen sein, das kalkweiß, rötlich verfärbt oder bräunlich erscheint und ein Dokument der über 1800jährigen Geschichte der Kalksteine und ihrer Beanspruchung darstellt. Natürlich werden sich Fragen zum Umgang mit dem Fugensystem anschließen, die aber an dieser Stelle nicht erörtert werden sollen.

#### *Vorläufiges Fazit der Konservierungsversuche*

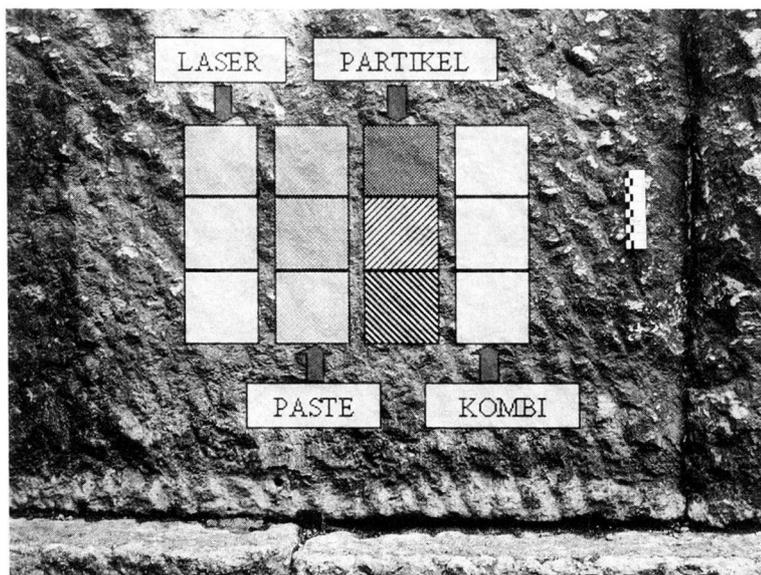
Die Applikation der optimierten Wirkstoffe erfolgte im April 2003. Geht man von der ersten Bewertung der Musterflächen nach einer Standzeit von 12 Monaten aus, so sind die nach den Testreihen ermittelten Kombinationen aus Tensiden und Siliconharzlasuren prinzipiell für eine Anwendung auf den Kalksteinen der porta praetoria geeignet. Es entscheiden aber nicht nur technisch-materielle Aspekte über die Applikation der chemischen Schutzsysteme. Der optisch nicht vollständig zufriedenstellende Eindruck, den die Beschichtungen mit Beteiligung von Siliconharzlasuren hinterlassen, bedarf sicherlich noch der Diskussion.

Ein entscheidendes Kriterium wird die dauerhafte Effektivität und das Alterungsverhalten der Behandlungen auf dem schadstoffreichen Untergrund sein. Beide Kriterien sollen im Laufe der kommenden Jahre durch ein kontinuierliches Monitoring beobachtet werden, dessen Ergebnisse in die abschließende Bewertung und Empfehlung einfließen sollen. Dabei ist zu betonen, dass die Voraussetzung für das Gelingen aller konservierenden Behandlungen die wirksame Reduzierung der Schadstofflast in der Gesteinsoberfläche und die Sanierung des Fugensystems ist. Erst nach der Reinigung und der Dekontamination der Oberflächen haben Maßnahmen zur Konsolidierung der morbiden Gesteinsoberflächen und zum Porenraumschutz einen konservatorischen Nutzen.

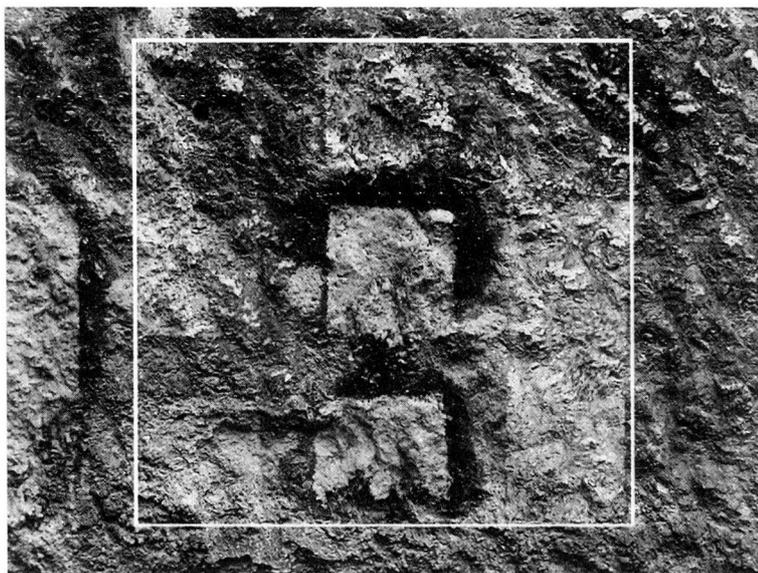
Gegen eine Festigung geschädigter Kalksteinoberflächen mit modifizierten Kieselsäureestern nach Vorbehandlung mit einem phosphatbasierten Haftvermittler bestehen keine Bedenken, da der konservierende Effekt dominiert und keiner beschleunigten Korrosion Vorschub geleistet wird. Das Konzept zur Erhaltung der thermisch vorgeschädigten und schadstoffbelasteten Kalksteinoberflächen sollte sich deshalb aus vier Einzelschritten zusammensetzen: der kombinierten Reinigung, der Dekontamination, der kombinierten Festigung und schließlich dem Porenraumschutz. Der konservatorische Weg ist aufgrund der Projektergebnisse vorgezeichnet.

Aus den genannten Gründen bestehen berechtigte Hoffnungen, dass nach der Reduzierung der Altlasten, der Verminderung der über Jahrhunderte gewachsenen Schadstofflast auf ein für carbonatische Oberflächen erträgliches Maß und dem Porenraumschutz die Neubildung schwarzer Beläge in Grenzen gehalten werden kann.

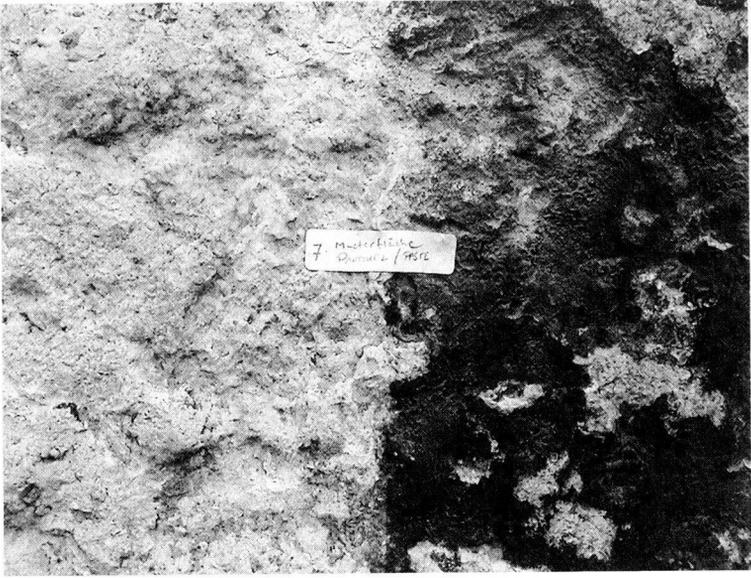
Der konservatorische Erfolg ist aber nur die eine Seite. Die andere Seite betrifft den ungemainen Zugewinn an ästhetischer Qualität, der nach der Restaurierung von dem römischen Bauwerk ausgehen sollte und das nachhaltige Interesse an seiner Erhaltung wach halten kann. Die porta praetoria hat es verdient, dauerhaft im Bewusstsein der einheimischen Bevölkerung verankert zu bleiben. Sie sollte ihr schlechtes Image als schwarzes Anhängsel des Bischofshofes verlieren. Vielleicht gelingt es auch, das „Römertor“ wieder zu einem der Zentren der Stadt und zu einem viel besuchten Botschafter der römischen Geschichte von Regensburg zu machen.



58: Versuchsfeld zur Reinigung (Probefläche 2, Ostfassade des Flankenturms); mit Angabe der konzipierten Reinigungsproben.



59: Versuchsfeld zur Reinigung nach der Applikation der Reinigungsvarianten am Beispiel von Probefeld 2 auf der Ostseite des Turmes der porta praetoria. Markierung (von links nach rechts): Spalte 1: Laserreinigung; Spalte 2: Kompressen- und Partikelstrahlreinigung; Spalte 3: Partikelstrahlreinigung.



60: Versuchsfeld zur Reinigung nach der Applikation einer kombinierten Reinigungsvariante am Beispiel von Probe MF2/7 auf der Nordseite des Turmes der porta praetoria (2002).



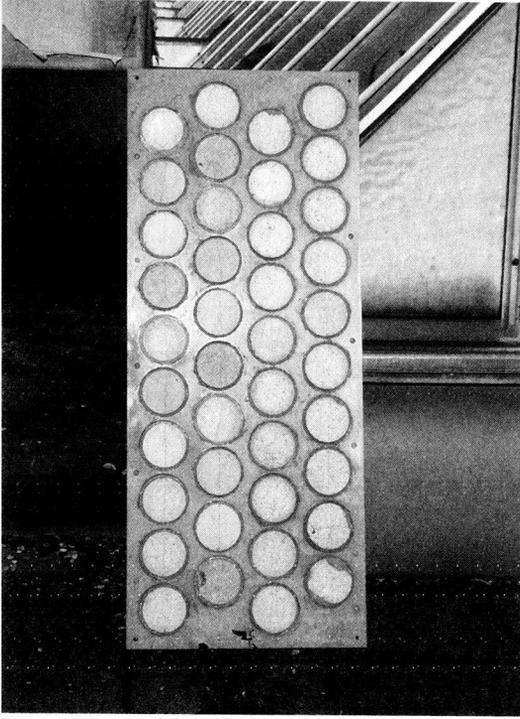
61: Versuchsfeld zur Reinigung nach der Applikation einer kombinierten Reinigungsvariante am Beispiel von Probe MF 2/8 auf der Nordostseite des Turmes der porta praetoria (2002).



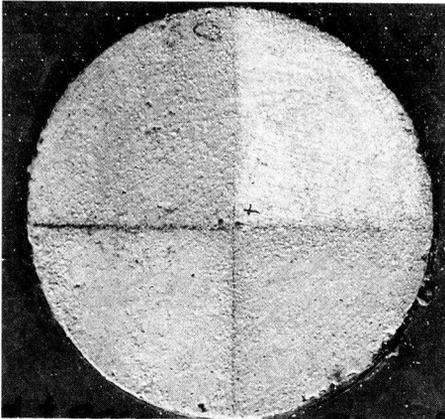
62: Musterfeld MF1 zur Reinigung nach der Applikation einer kombinierten Reinigungsvariante auf der Ostseite des Turmes der porta praetoria (2002).



63: Musterfeld MF2 zur Reinigung nach der Applikation einer kombinierten Reinigungsvariante auf der Ostseite des Turmes der porta praetoria. Die feucht erscheinende Fleckigkeit beruht auf der Einlagerung hygroscopischer Salze in der korrodierten Kalksteinoberfläche (2002).

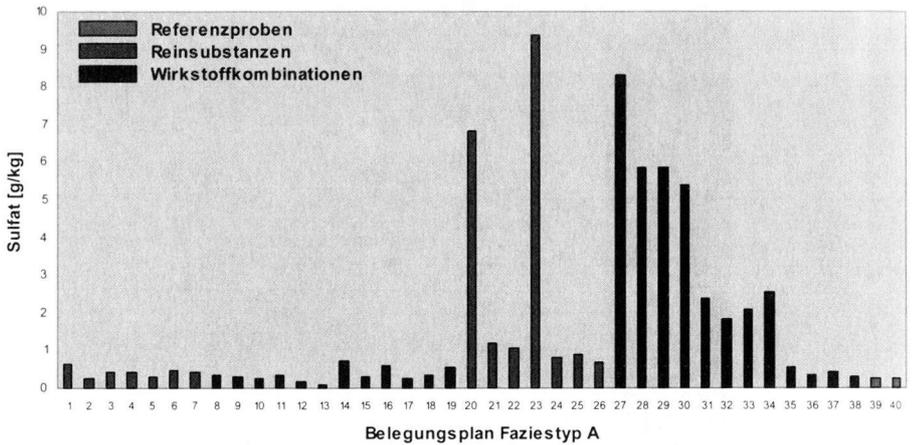


64: Mustertafel für die Expositionsversuche am Beispiel von Faziestyp A-C (fein).



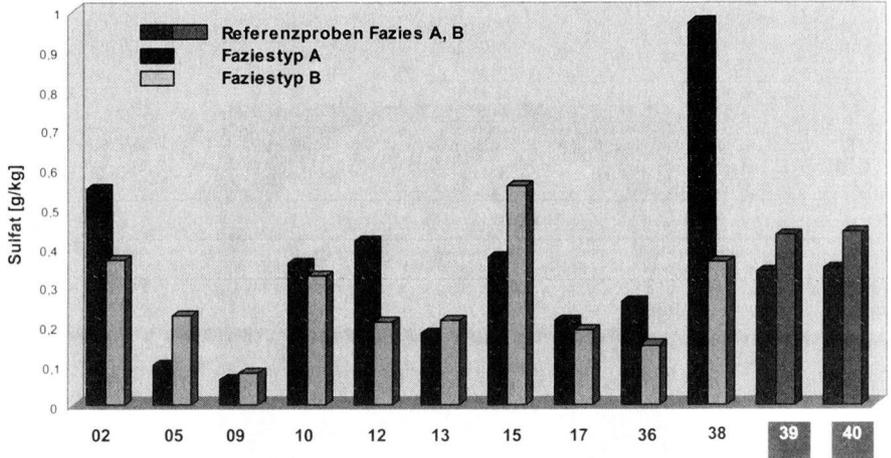
65: Beschichteter Gesteinskörper für die Expositionsversuche am Beispiel von Faziestyp A-C (fein). Nr. B 05; Schabeproben der Oberfläche. Quadrant links unten: Vorkorrosion mit Säurelösung. Quadrant rechts oben: Langzeitkorrosion.

Grafik zu Tabelle C.05: Ergebnisliste Vorkorrosion (Sulfatbildungsrate)



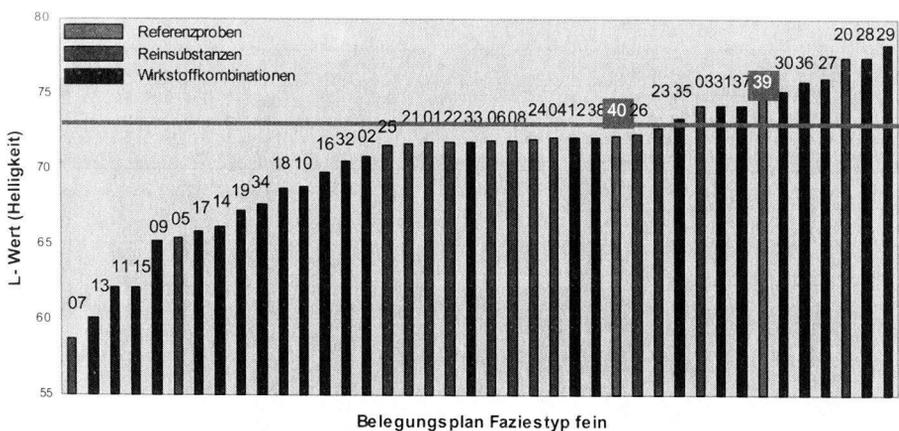
66: Bewertung der Beschichtungssysteme nach den Vorversuchen am Beispiel von Faziestyp A; Beständigkeit gegenüber saurem Angriff (Sulfatbildungsrate; in g/kg).

Grafik zu Tabelle C.07: Faziestyp A und B; Ergebnisliste Langzeitkorrosion



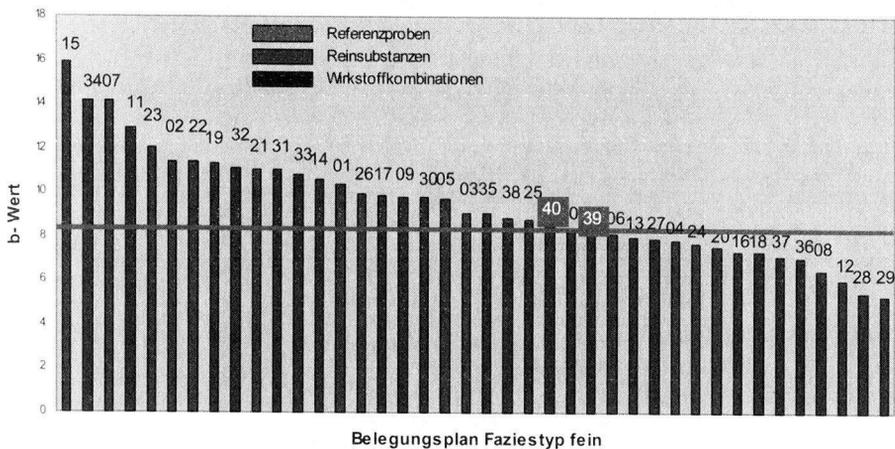
67: Ergebnisliste; Vergleich der Sulfatbildungsraten der Faziestypen A und B) Beständigkeit ausgewählter Beschichtungen nach sechsmonatiger Freilandbewitterung; Sulfatbildungsrate in g/kg.

Grafik zu Tabelle C.12: Faziestyp A (fein); Rankingliste des L- Wertes



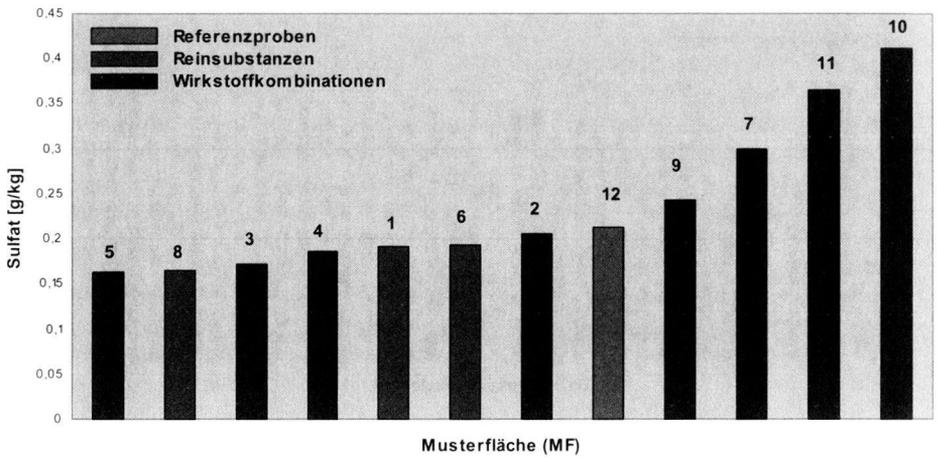
68: Rankingliste; Farbwertbestimmung Faziestyp A; Beständigkeit der Beschichtungen bei Freilandwitterung; geordnet nach aufsteigendem L-Wert (Helligkeit).

Grafik zu Tabelle C.13: Faziestyp A (fein); Rankingliste des b- Wertes

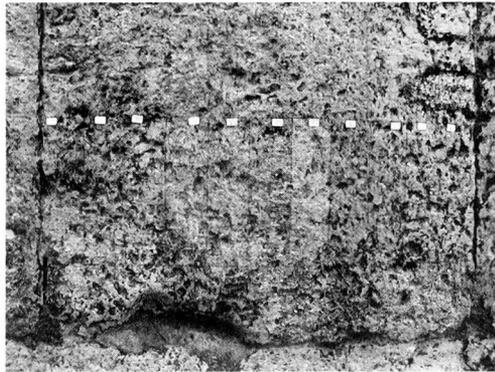


69: Rankingliste; Farbwertbestimmung Faziestyp A; Beständigkeit der Beschichtungen bei Freilandbewitterung; geordnet nach absteigendem a-Wert.

Grafik zu Tabelle C.20: Sulfatbildungsrate (Vorkorrosion)



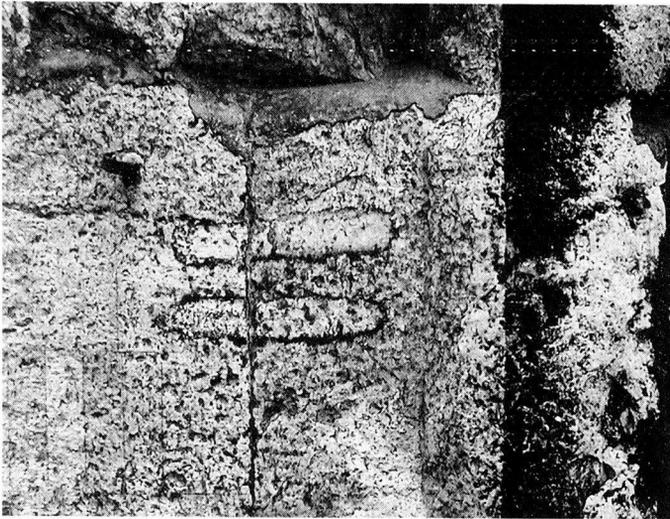
70: Beurteilung der Beschichtungssysteme für den Praxisversuch nach der Freilandexposition. Rankingliste der Sulfatbildungsrate am Beispiel von Faziestyp A (Angabe in g/kg).



71: Musterfeld MK2 zur Konservierung nach der Applikation kombinierter Beschichtungssysteme zum Porenraumschutz an der Nordseite des Turmes der porta praetoria innerhalb der Reinigungsmusterfläche MF 2 (Dezember 2003).



72: Ausschnitt aus der Musterfläche 2, vor der Reinigung (2001).



73: Ausschnitt aus der Musterfläche 2, nach der Reinigung (2003).

Nr.	Typ und Bezeichnung	Applikationsform
1	Servoxyyl VPNZ 7/100	1%, in MeOH/MEK; 2x Pinselauftrag
2	Rewopal HV9	1%, in MeOH/MEK; 2x Pinselauftrag
3	Rewomid DC2121s	1%, in MeOH/MEK; 2x Pinselauftrag
4	Funcosil Lasur	ohne Verdünnung; 1x Pinselauftrag
5	Funcosil Schlämmlasur	ohne Verdünnung; 1x Pinselauftrag
6	Paraloid B72	5%ig, in Ethylacetat, 2x Pinselauftrag
7	PTFE	5%ig, in Wasser, 2x Pinselauftrag
20	DL-Weinsäure,	1,0 m, in Wasser, 2x Pinselauftrag
21	Phytinsäure	1:10, in Wasser, 2x Pinselauftrag
22	Dibenzylphosphat	1%, in MeOH/MEK; 2x Pinselauftrag
23	Funcosil 300	Unverdünnt ,2x Pinselauftrag
24	Funcosil 500 E	Unverdünnt, 2x Pinselauftrag
25	Funcosil 500 STE	Unverdünnt, 2x Pinselauftrag
26	Oxalsäure	0,01 m, 0,1 m; 3x gestufter Pinselauftrag

Tab. 5: Zusammenstellung der Wirkstoffe für die Laborversuche, mit Angabe der Applikationsform.

MF	Probenbezeichnung	Applikationsform
01	Rewopal HV9	1%, in MeOH/MEK; 2x Pinselauftrag
02	Rewopal + Funcosil Schlämmlasur	1 : 10 Verdünnung (Wasser), 2x
03	Rewopal + Funcosil Schlämmlasur	1 : 20 Verdünnung (Wasser), 2x
04	Rewopal + Funcosil Lasur	1 : 10 Verdünnung (Wasser), 2x
05	Rewopal + Funcosil Lasur	1 : 20 Verdünnung (Wasser), 2x
06	Servoxyyl VPNZ 7/100	1%, in MeOH/MEK; 2x Pinselauftrag
07	Servoxyyl + PTFE	PTFE 5%, in Wasser), 2x
08	Lutensol AP8	1%, in MeOH/MEK; 2x
09	Lutensol + Funcosil Schlämmlasur	1 : 10 Verdünnung (Wasser), 2x
10	Lutensol + Funcosil Schlämmlasur	1 : 20 Verdünnung (Wasser), 2x
11	Dibenzylphosphat (DBPh) + Oxalsäure	DBPh 1%, in MeOH/MEK; 1. Tag: 0,01 m Oxalsäure, 6. Tag: 0,01 m Oxalsäure, 7. Tag: 0, 1 m Oxalsäure, je 2x
12	Referenz (unbehandelt)	(ohne)

Tab. 6: Zusammenstellung Wirkstoffe und Wirkstoffkombinationen für die Bemusterung am Objekt, mit Angabe der Applikationsform.

ANHANG Teil D: Entwicklung eines  
Konservierungskonzeptes für die porta praetoria

*Anhang D.1: Reinigung – Material und Methoden*

*Laserreinigung:*

- Lasertyp:* Nd-YAG- Laser (1064 nm).  
*System:* Lasersystem BMI-NL-102  
*Parameter:* Zeile 1: Energie: 0,225; Fokussierung: 3.  
Zeile 2: Energie: 0,32; Fokussierung: 4.  
Zeile 3: Energie: 0,42; Fokussierung: 5.

*Ionentauscher (Komresse):*

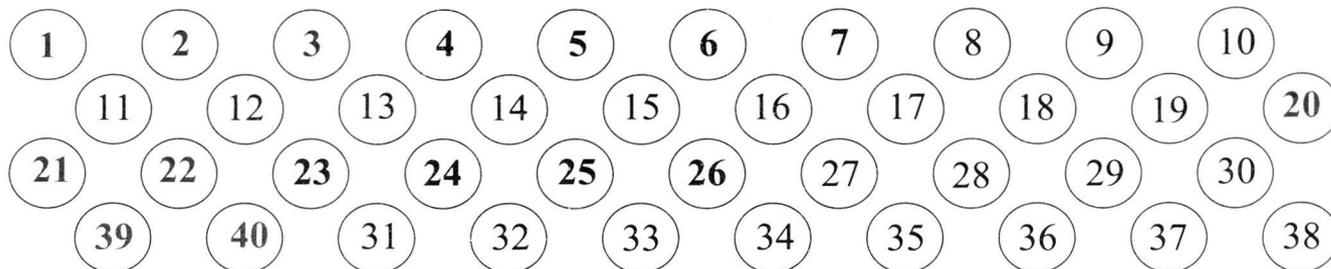
- Ionentauschertyp:* Basischer, carbonatbelegter Ionentauscher  
(Polyurethanmatrix).  
*Komresse:* Anteigen des Ionentauschers mit Wasser und gebleichtem  
Buchenzellstoff. Mischungsverhältnis (MV) Ionentauscher/  
Zellstoff: 1: 1.  
*Methode:* Auftragen des feuchten Kompressenmaterials auf die mit Was-  
ser vorgehätsste Oberfläche. Schutz vor Austrocknung durch  
Abdecken mit Polyethylenfolie (PE).  
*Materialverbrauch:* für 100 cm<sup>2</sup> Oberfläche 100 g Kompressenmaterial.  
*Einwirkzeit:* 24 bis 72 Stunden.  
*Parameter:* Zeile 1: einmaliger (1×) Kompressenauftrag.  
Zeile 2: 2×.  
Zeile 3: 3×.

*Niederdruckstrahlverfahren (Partikel):*

- Verfahren:* Kesselvolumen: 25 l, Düsenquerschnitt: 4 mm.  
*Hersteller:* Schmitt Niederdruckstrahltechnik.  
*Strahlgut:* Steinpudermehl; Korngrößen: 0,005 –0,2 mm.  
*Strahlrdruck:* 0,2 bis 0,5 bar.  
*Materialverbrauch:* für 100 cm<sup>2</sup> nicht bestimmt.  
*Parameter:* Zeile 1: Strahlzeit 1–2 min.  
Zeile 2: Strahlzeit 2–4 min.  
Zeile 3: Strahlzeit 3–6 min.

Anhang D.2: Konservierungsversuche – Material und Methoden. Zusammenstellung der Wirkstoffe für die Konservierungsversuche mit den Angaben der Hersteller.

Nr.	Einsatz	Bezugsquelle			Typ und Bezeichnung (chemische Charakterisierung)
		Hersteller /Lieferant	Artikel	Bestell-Nr.	
1	Tensid	Saso Servo BV Langestraat 167 7491 AE Postfach 1 7490 AA Delden NL Tel. +31/74/3775000; Internet; telefonische Bestellung.			<b>Servoxyll</b> VPNZ 7/100 Nonylphenol ether phosphate, acide form (7 EO) CAS-Nr. 68412-53-3; andere Bez.: Nonylphenolpolyethylenglycoether-(7 EO)-phosphatester.
2	Tensid	Goldschmidt Produkte; WITCO Surfactants GmbH Industriegebiet West Max-Wolf-Str. 7 D-36396 Steinau			<b>Rewopal HV9</b> Nonylphenolpolyethoxylat; andere Bez.: Poly(oxy-1,2-ethandiyl), $\alpha$ -nonylphenyl- $\Omega$ -hydroxy-XXX.
2a	Tensid	BASF Aktiengesellschaft 67056 Ludwigshafen  Art.: 50067210 Lot.: 372948			<b>Lutensol AP 8</b>  Nonylphenoethoxylat; Ersatzprodukt für Rewopal.
3	Tensid	Goldschmidt Produkte; (analog Nr.2)			<b>Rewomid DC 212S</b> (Diethanolamin + nichtionische Tenside)
3a	Tensid	VP, Fa. Schlenk GmbH&CoKG			<b>PSF</b> (Polysulfonsäurederivat)
4	Hydrophobierung	Remmers	TM 6475+76	TM 6475	<b>Funcosil Historic Lasur</b> (Siliconharzdispersion)
5	Hydrophobierung	Remmers	TM 6470+71	TM 6470	<b>Funcosil Historic Schlämmlasur</b> (Siliconharzdispersion)
6	Hydrophobierung	Aldrich	44,509-6 / S.1737	44,509-6	Polytetrafluorethylen ( <b>PTFE</b> ) 60 Ma.-%; Dispersion in Wasser
7	Hydrophobierung	Rohm & Haas	Kremer Pigmente	(Muster vorhanden)	<b>Paraloid B72</b> (Polyacrylat, Terpolymer, PMMA, PEMA)
20	Haftvermittler	Aldrich	T40-0 / S.2081	T40-0	<b>DL-Weinsäure</b> , 99% (2,3-Dihydroxybernsteinsäure)
21	Haftvermittler	Aldrich	28,966-3 / S.1657	28,966-3	<b>Phytinsäure</b> , 40 wt% in Wasser
22	Haftvermittler	Aldrich	D3,655-0 / S.1646	D3,655-0	<b>Dibenzylphosphat</b> (Phosphorsäuredibenzylester)
22a	Haftvermittler	BASF			<b>Phosphorsäuremonoisotridecylester</b> , W10, aminstabilisiert
23	Festiger	Remmers	(Hilbert)	(Muster)	<b>Funcosil 300</b> (Tetraethylsilicat, Kieselsäureethylester)
24	Festiger	Remmers	(Hilbert)	(Muster)	<b>Funcosil 500 S</b> (Tetraethylsilicat, Kieselsäureethylester)
25	Festiger	Remmers	(Hilbert)	(Muster)	<b>Funcosil 500 STE</b> (Tetraethylsilicat, Kieselsäureethylester)
26	nn	Aldrich	O-875-5	O-875-5	<b>Oxalsäure</b> Dihydrat



Nr.	Probenbezeichnung	Nr.	Probenbezeichnung	Nr.	Probenbezeichnung
1	Servoxyl	14	Rewopal + PTFE	27	Weinsäure + Funcosil 300
2	Rewopal	15	Rewopal + Paraloid B72	28	Weinsäure + Funcosil 500 E
3	Rewomid	16	Rewomid + Funcosil Lasur	29	Weinsäure + Funcosil 500 STE
4	Funcosil Lasur	17	Rewomid + Funcosil Schlämmlasur	30	Weinsäure + Oxalsäure
5	Funcosil Schlämmlasur	18	Rewomid+ PTFE	31	Phytinsäure + Funcosil 300
6	PTFE	19	Rewomid + Paraloid B72	32	Phytinsäure + Funcosil 500 E
7	Paraloid B72	20	Weinsäure	33	Phytinsäure + Funcosil 500 STE
8	Servoxyl + Funcosil Lasur	21	Phytinsäure	34	Phytinsäure + Oxalsäure
9	Servoxyl + Funcosil Schlämmlasur	22	Dibenzylphosphat	35	Dibenzylphosphat + Funcosil 300
10	Servoxyl + PTFE	23	Funcosil 300	36	Dibenzylphosphat + Funcosil 500 E
11	Servoxyl + Paraloid B72	24	Funcosil 500 E	37	Dibenzylphosphat + Funcosil 500 STE
12	Rewopal + Funcosil Lasur	25	Funcosil 500 STE	38	Dibenzylphosphat + Oxalsäure
13	Rewopal + Funcosil Schlämmlasur	26	Oxalsäure	39, 40	unbehandelte Proben

#### Anhang D.4: Konservierungsversuche – Material und Methoden.

##### Analyseparameter Vorkorrosion (Schnellkorrosion)

###### Sulfatbestimmungsrate:

- Faziestyp:** fein (Trägerplatte A).  
**Reaktionsfläche:** 78,5 cm<sup>2</sup> (½ Scheibe).  
**Reaktionslösung:** H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
**pH** 3,00  
**Stammlösung:** H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; pH 5,3, (Kohlensäurelösung).  
**Säurezugabe:** H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1 m Schwefelsäure); Einstellung pH 3,30.  
**Applikationsform:** Aufbringen eines Schutzfilms auf einer Probenhälfte; anschließend 2 × Pinselauftrag der Reaktionslösung auf der ungeschützten Testfläche; nach 2 Tagen Nachreinigung mit Wasser.  
**Schutzfilm:** Cyclododecan.  
**Probematerial:** Schabeprobe (Skalpelle) von ca. 39 cm<sup>2</sup> der beschichteten Kalksteinoberfläche (¼ der Probescheibe).  
**Analyse (Sulfat):** Ionenchromatographie.  
**IC-Methode:** Kaltwasserauszug.  
**Analyse (Phasen):** FT-IR- Mikrospektroskopie.  
**IR-Methode:** Partikelmessung in Transmission; Diamantzellenpräparat.

##### Analyseparameter Expositionsversuche (Langzeitkorrosion)

###### Sulfatbildungsrate:

- Faziestyp:** fein, grob (Trägerplatte A, B).  
**Testfläche:** 39 cm<sup>2</sup> (¼ Scheibe).  
**Expositionszeit:** 6 Monate.  
**Probematerial:** Schabeprobe (Skalpelle) von der beschichteten Kalksteinoberfläche.  
**Analyse (Sulfat):** Ionenchromatographie  
**IC-Methode:** Kaltwasserauszug.  
**Analyse (Phasen):** FT-IR-/Raman- Mikrospektroskopie  
**IR-Methode:** Partikelmessung in Transmission; Diamantzellenpräparat, Background gegen Luft.  
**Raman:** Preßpräparat, Anregung/Nd-YAG-Laser bei 1024 nm.

##### Analyseparameter Expositionsversuche (Langzeitkorrosion)

###### Farbwertbestimmung:

- Faziestyp:** fein, grob (Trägerplatte A, B).  
**Testfläche:** 39 cm<sup>2</sup> (¼ Scheibe).  
**Expositionszeit:** 6 Monate.  
**Messfeld:** 1 cm<sup>2</sup>.  
**Analyse:** Lichtmessung.  
**Methode:** Reflektometrie (Ulbrichtkugel)  
**Farbmetrik:** CIELAB, CIE 1976  
**Standard:** Bariumsulfat (Weißstandard)  
**Messwerte:** L\* a\* b\*-Werte.

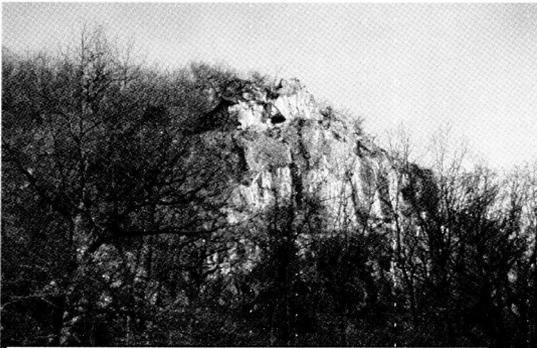
## Malm-Kalk (Kalke und Dolomit): Marienhöhe und Mariaort - Tafel 1



1 – Massenkalk (20 m) Kleinprüfening



2 – Dolomit an der obersten Treppe



3 – Felsen östl. d. Stbr. im Naab-Tal



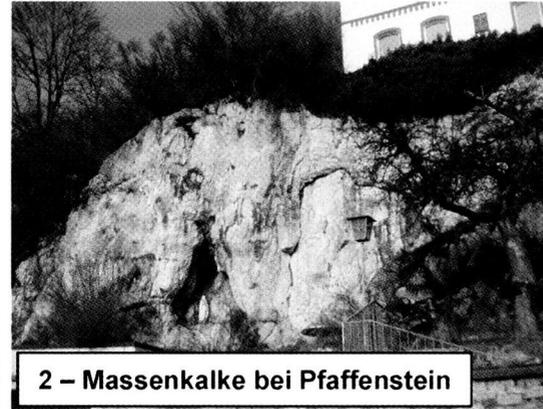
4 – Grobschuttkalk am östl. Felsen

**Malm-Massenkalke): Pfaffenstein und Großprüfening**

**- Tafel 2**



**1 – Marienhöhle vor Kneiting**



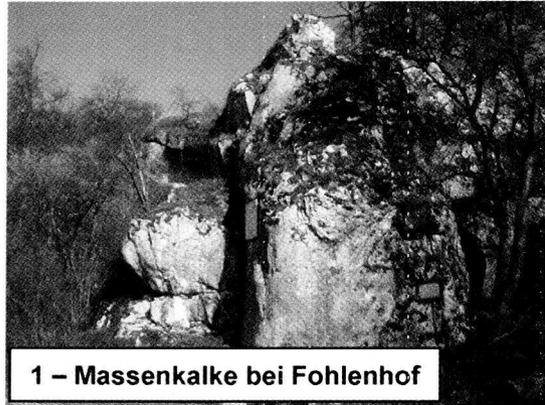
**2 – Massenkalke bei Pfaffenstein**



**3 – An der Straße südl. Großprüfening**



**4 – Dunkle Dolomitlinse im Massenkalk**



1 – Massenkalke bei Fohlenhof



2 – Gebankte Kalke bei Unterirading



3 – Grobgebankte Kalke bei Matting

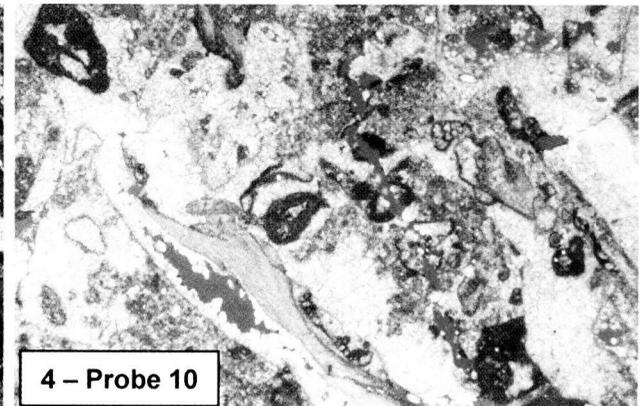
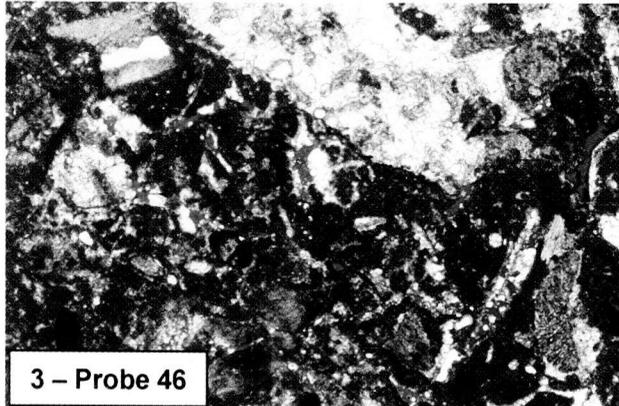
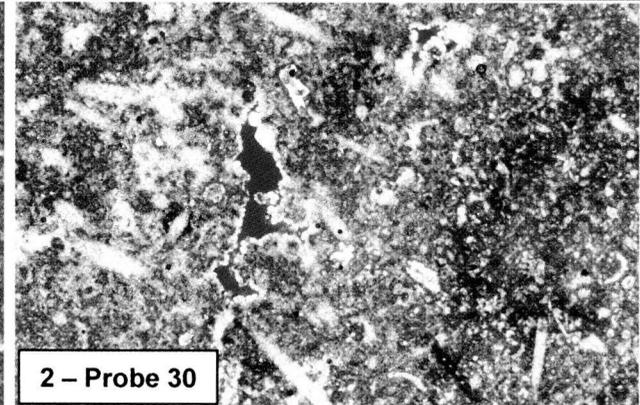
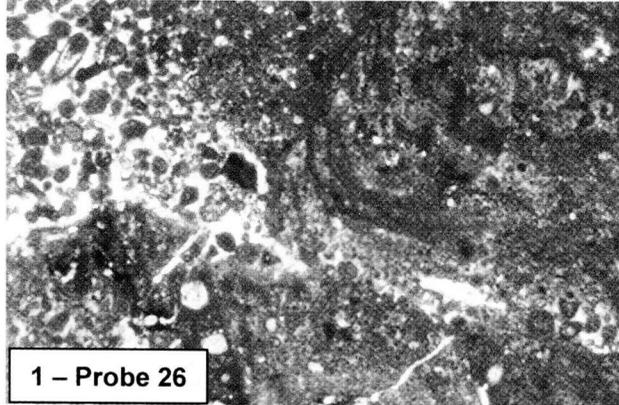


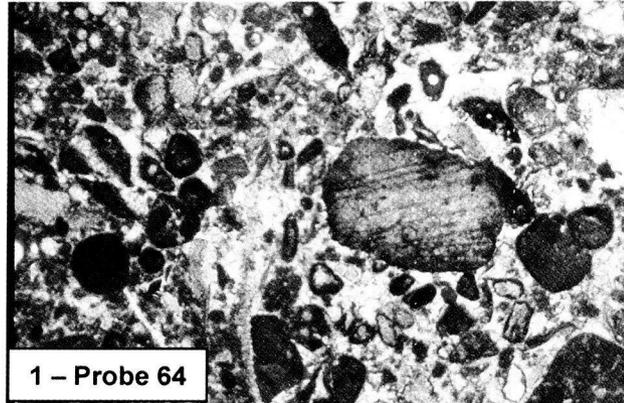
4 – Dolomitbruch vor Oberndorf

**Porta Praetoria**

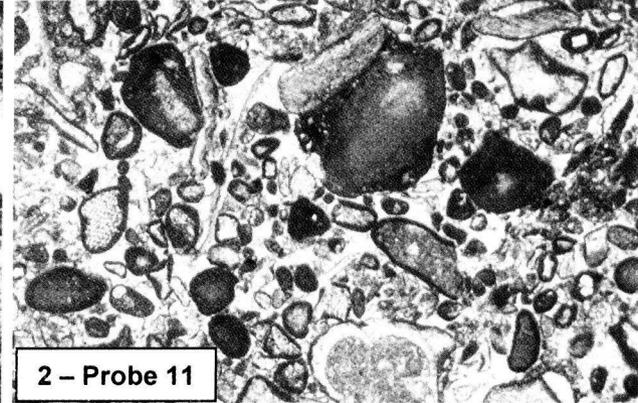
**Matrix-reiche Faziestypen**

**- Tafel 4**

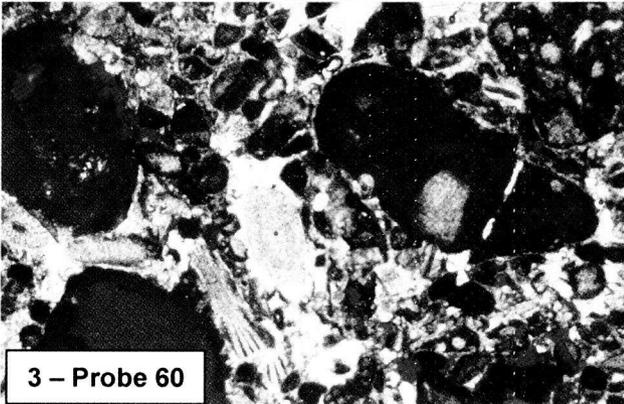




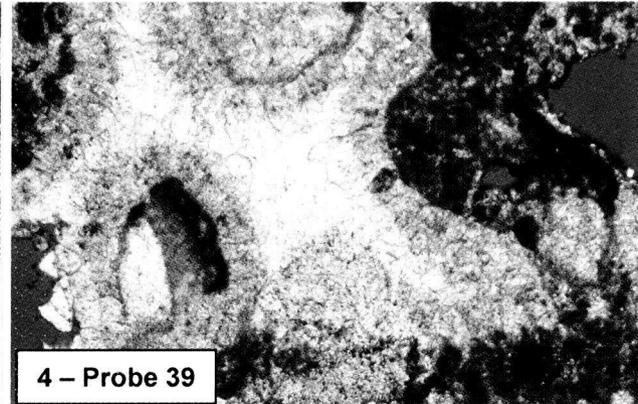
1 - Probe 64



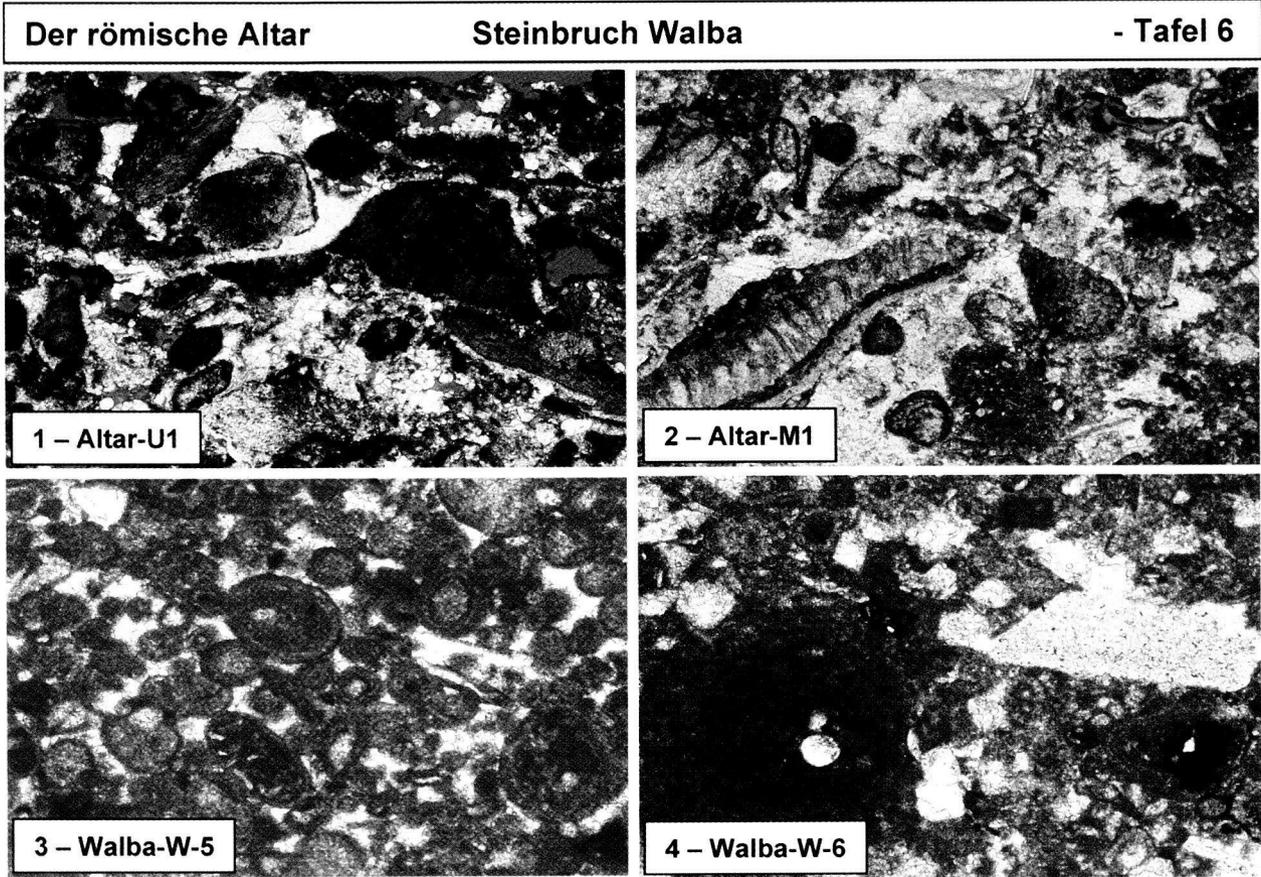
2 - Probe 11

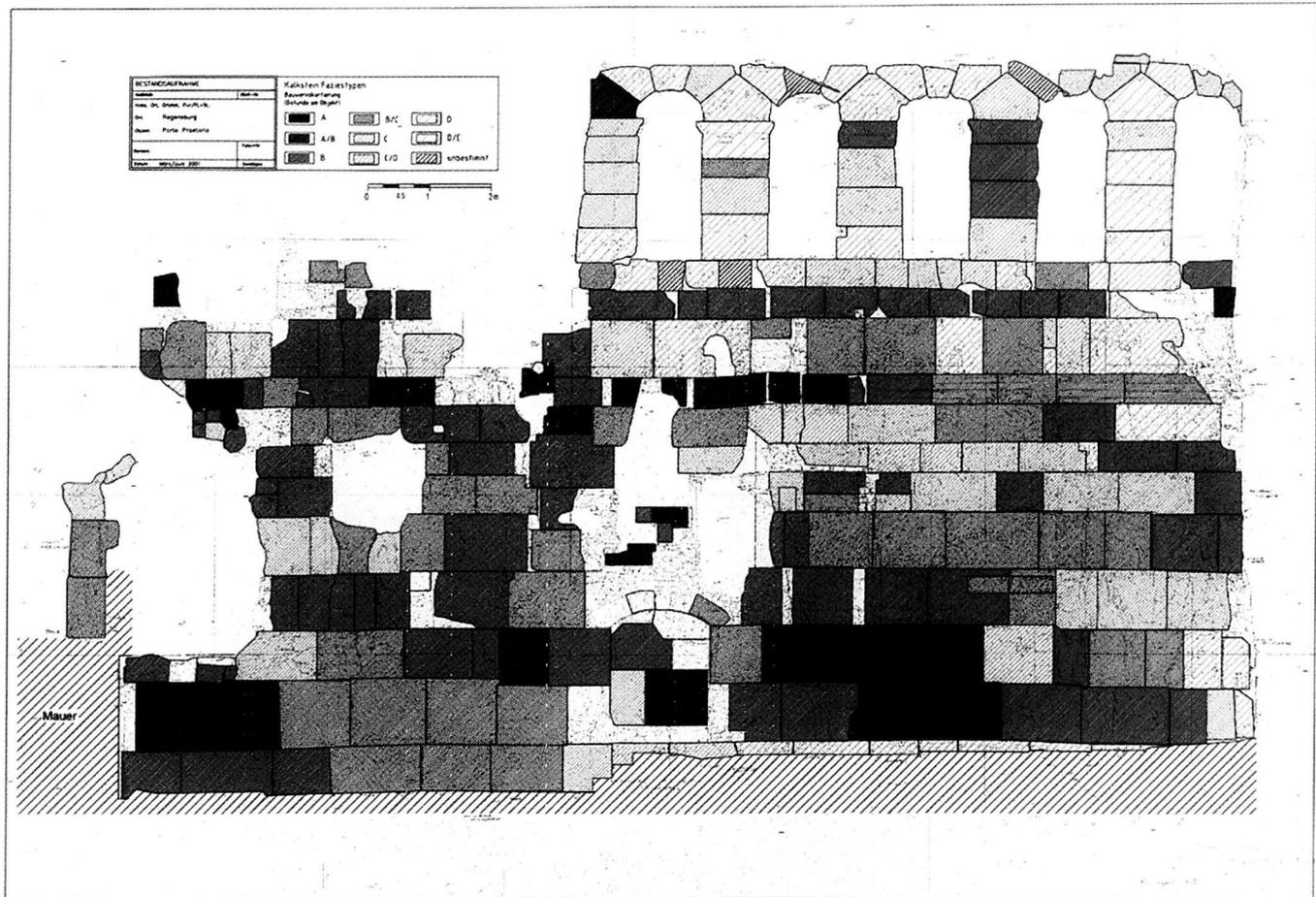


3 - Probe 60

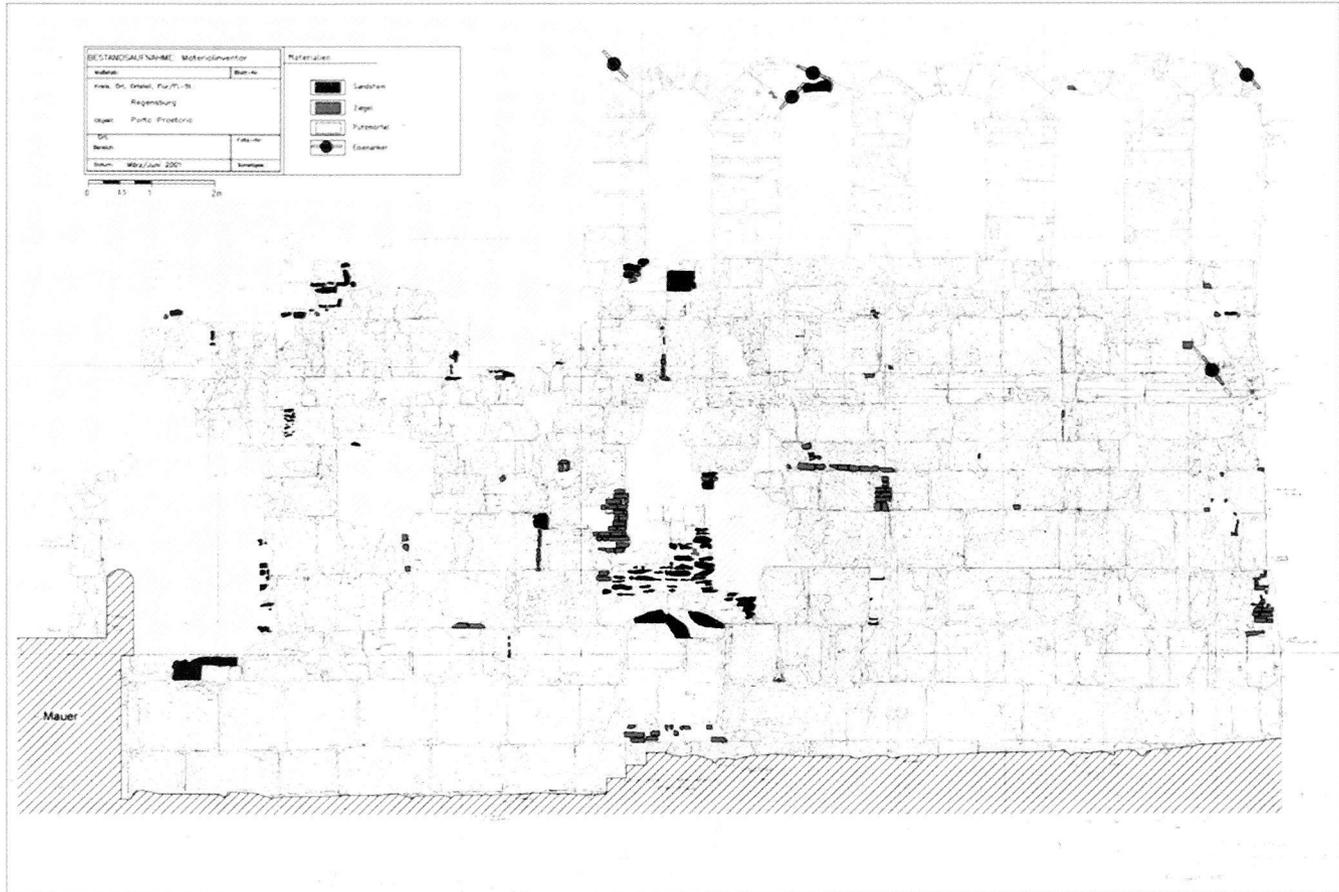


4 - Probe 39

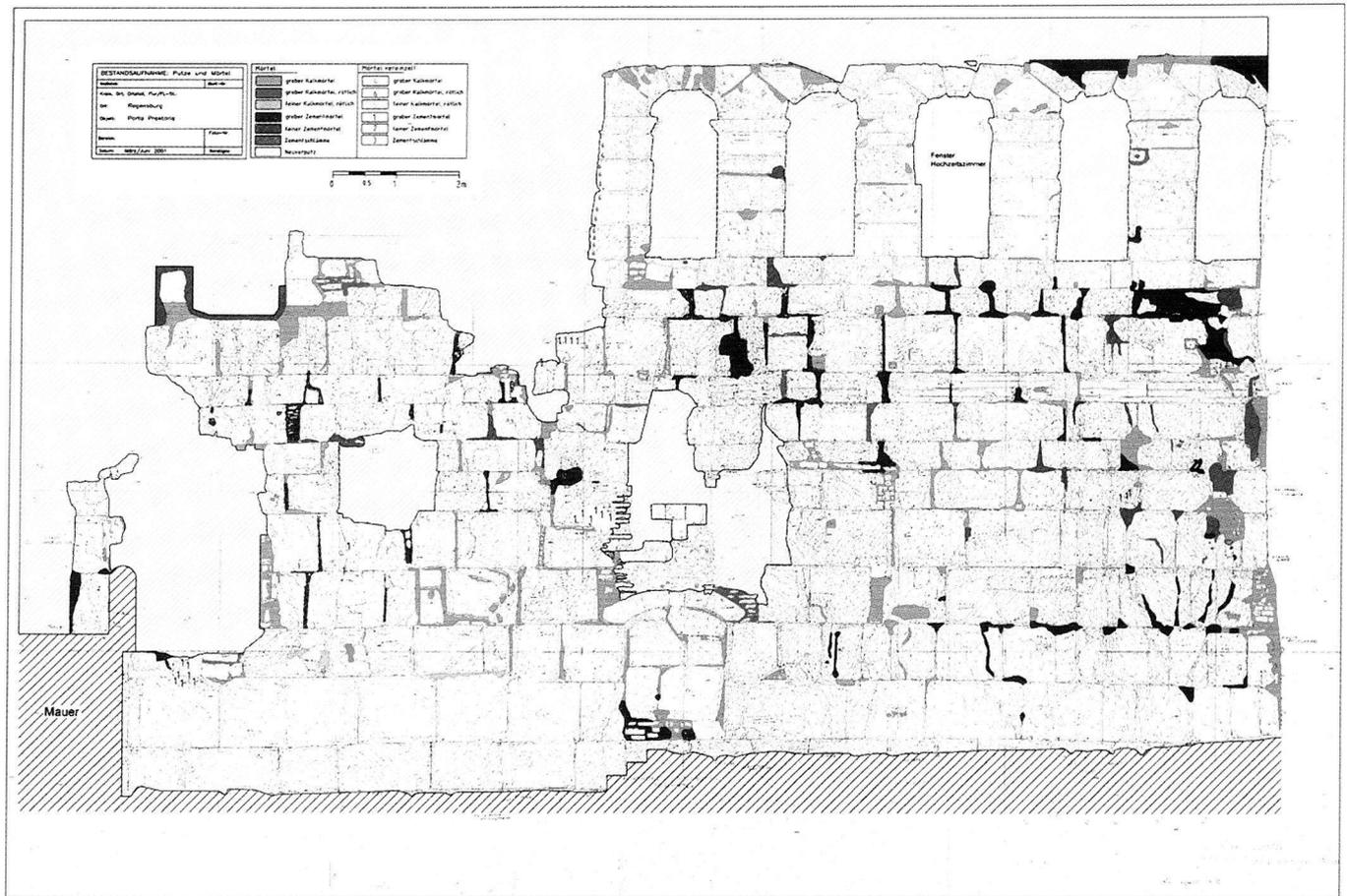




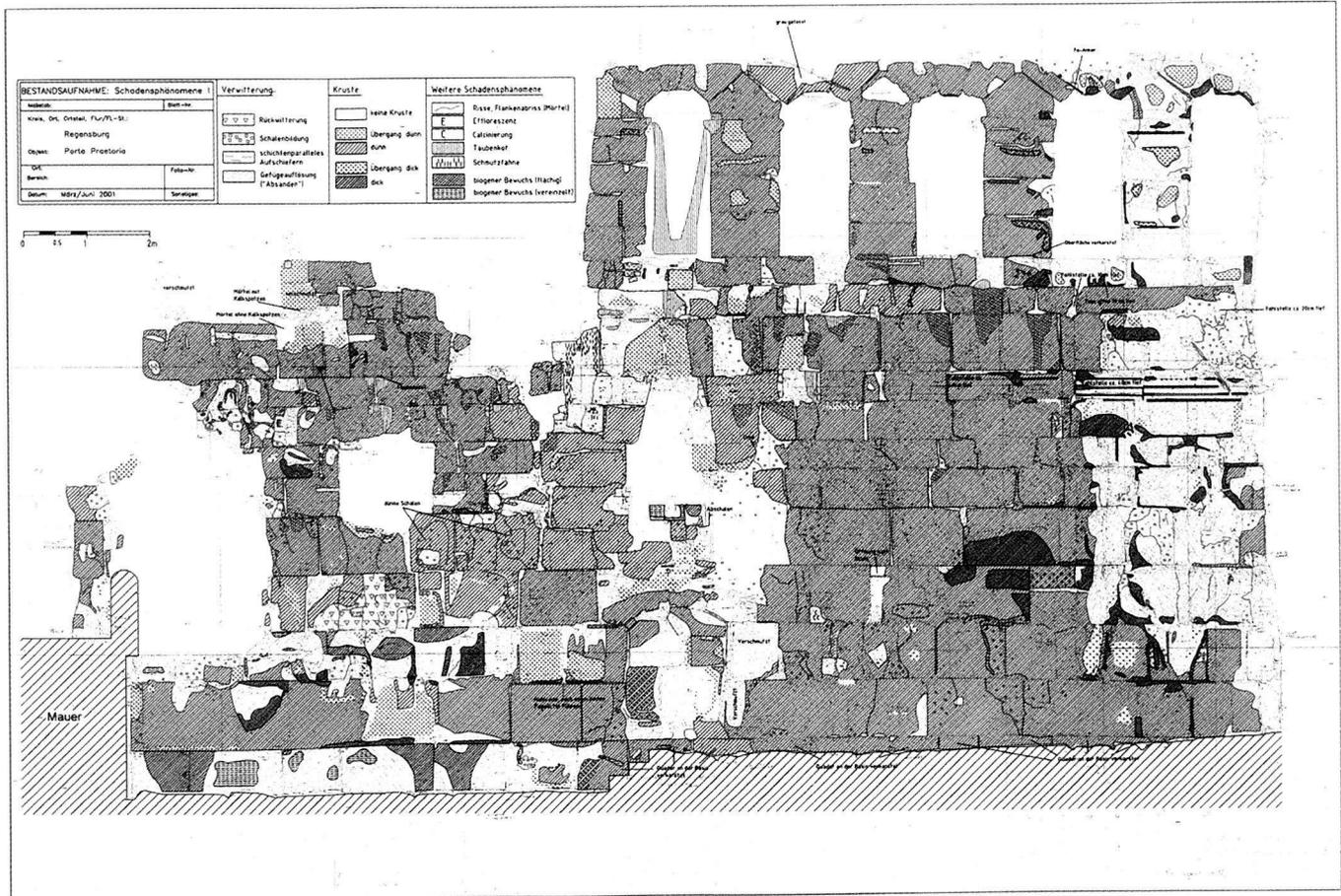
C. 1: Kartographische Bestandsaufnahme Materialinventar – Kalksteine, Faziestypen



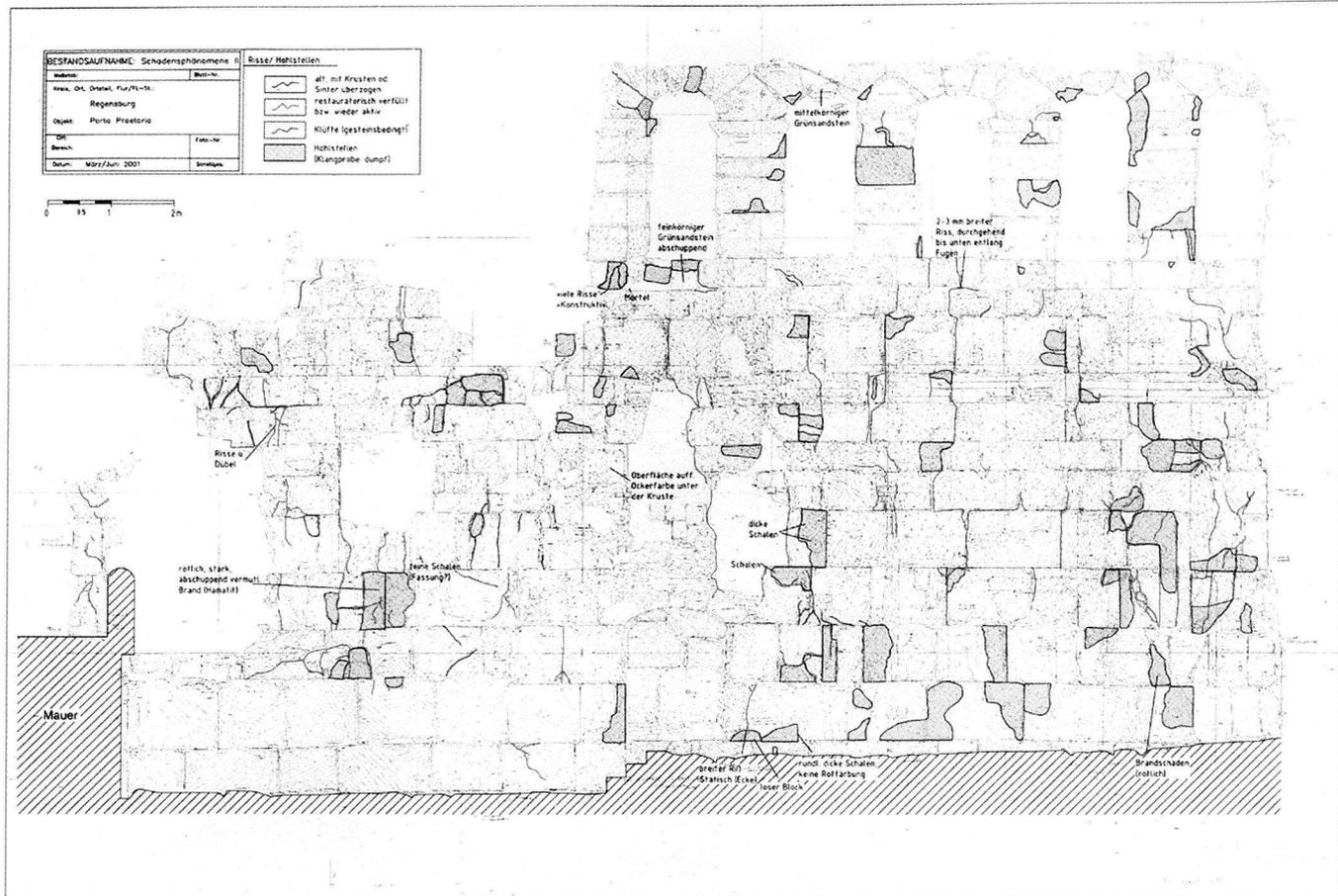
C. 2: Kartographische Bestandsaufnahme Materialinventar – andere Materialien



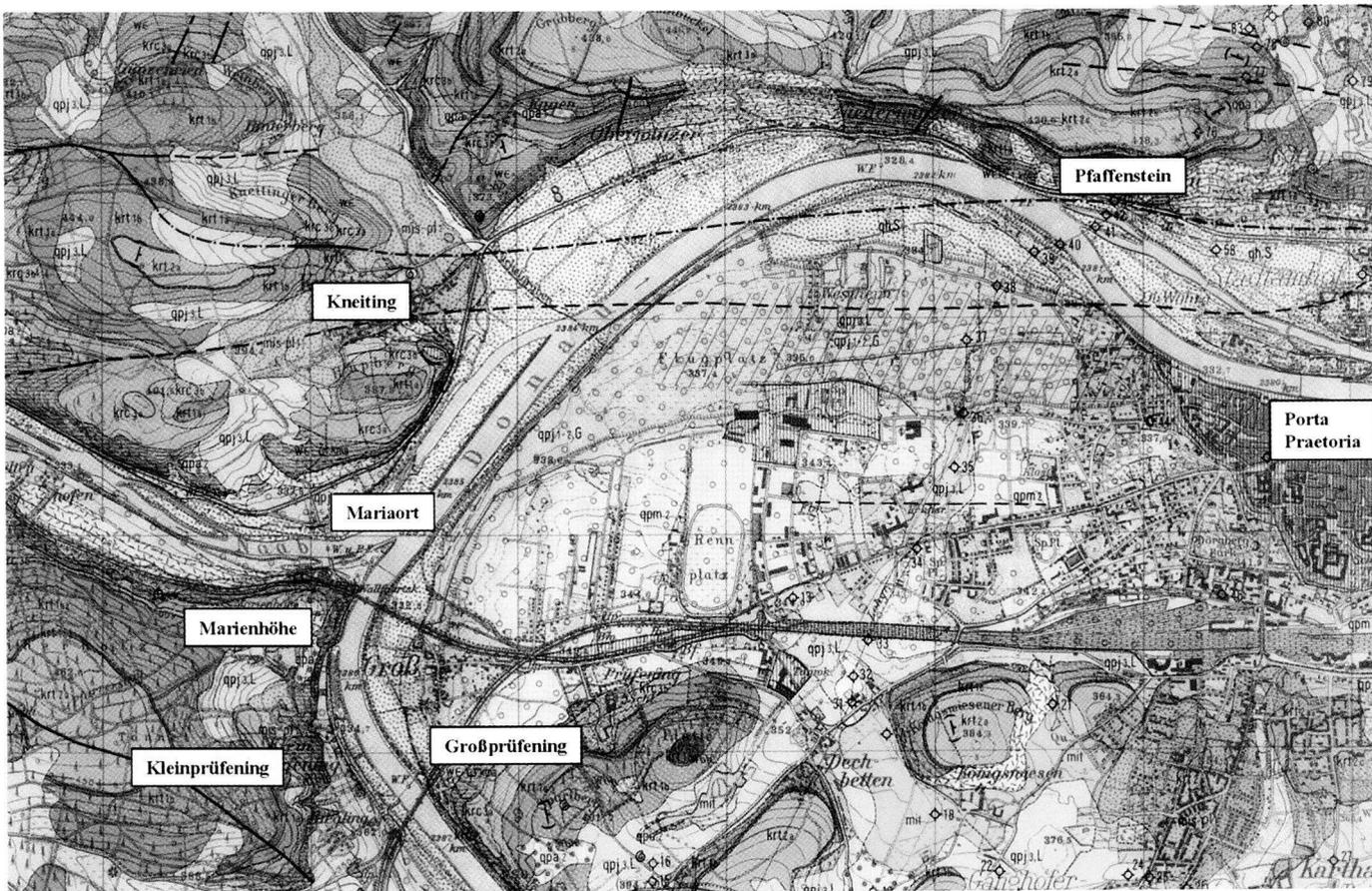
C. 3: Kartographische Bestandsaufnahme Materialinventar – Putzmörtel und Fugmassen



C. 4: Kartographische Bestandsaufnahme Schadensphänomene I



C. 5: Kartographische Bestandsaufnahme Schadensphänomene II



55a/55b Angabe der unmittelbar bei Regensburg liegenden möglichen Abbaugebiete zur Gewinnung von Malmkalken.



## Inhalt

TEIL A: <i>Auswertung der Plan- und Bildunterlagen</i> . . . . .	7
1 Spurensuche – Geschichtlicher Abriss und das heutige Bild der porta praetoria . . . . . von Rainer Drewello und Lutz-Michael Dallmeier	7
2 Anmerkungen zur Bearbeitung der Archivalien und des Bildmaterials von Ursula Drewello und Niels Pelzer	10
3 Spurenanalyse – Chronologie und Auswertung des Bildmaterials . . . . . von Ursula Drewello	12
Anhang . . . . .	47
TEIL B: <i>Die Kalksteine an der porta praetoria</i> . . . . .	54
1 Kalksteine und Herkunftsanalyse . . . . . von Roman Koch und Rainer Drewello	54
2 Anmerkungen zur Bildung von Kalksteinen . . . . . von Roman Koch	62
3 Der Malm in Süddeutschland . . . . .	65
4 Die Kalke des Malm im Raum Regensburg und Kelheim . . . . . von Roman Koch und Erik Flügel	70
5 Abbaugebiete in der näheren Umgebung von Regensburg . . . . . von Roman Koch	76
6 Kartierung der Kalksteinfazies an der porta praetoria . . . . . von Roman Koch und Heinz-Georg Lorenz	82
7 Schlussfolgerungen . . . . . von Roman Koch, Rainer Drewello und Heinz-Georg Lorenz	88
Literatur . . . . .	91
Tabellen 1–4 . . . . .	103
Anhang . . . . .	105

TEIL C: <i>Begleitende Untersuchungen am Objekt</i> . . . . .	116
1 Das Materialinventar der Außenfassaden der porta praetoria von Rainer Drewello und Thomas Köberle . . . . .	116
2 Putze, Mörtel und Farbfassungen . . . . .	120
von Rainer Drewello	
3 Anmerkungen zum Zustand der porta praetoria . . . . .	124
von Rainer Drewello und Thomas Köberle	
4 Zusammenfassung der Befunde . . . . .	131
von Rainer Drewello	
TEIL D: <i>Neue Konzepte in der Kalksteinkonservierung an der porta praetoria</i> von Rainer Drewello	142
1 Entwicklung eines Konservierungskonzeptes . . . . .	142
Anforderungen an das Konzept . . . . .	142
Die Reinigung . . . . .	143
Der Schutz des Porenraums . . . . .	144
Die Festigung . . . . .	145
Die Hydrophobierung . . . . .	146
2 Die Oberflächenreinigung . . . . .	147
Was man sieht und weiß . . . . .	147
Vorbereitung der Flächenreinigung . . . . .	149
Der Praxistest – Musterflächen zur Reinigung am Objekt . . . . .	151
Die naturwissenschaftliche Kontrolle . . . . .	152
Ergebnisse und Empfehlungen . . . . .	153
3 Versuche zur Konservierung . . . . .	155
Material und Methoden . . . . .	155
Versuchsreihe zur Vorkorrosion – Behandlung mit Säurelösung . . . . .	158
Expositionsversuche (Langzeitkorrosion) . . . . .	160
Wirkstoffkombinationen und Musterfelder im Praxistest . . . . .	163
4 Schlussfolgerungen . . . . .	165
Erstes Fazit der Reinigungsergebnisse . . . . .	166
Vorläufiges Fazit der Konservierungsversuche . . . . .	167
Tabellen 5 und 6 . . . . .	176
Anhang . . . . .	177
Anhang C1–C5 . . . . .	187
Autorenverzeichnis . . . . .	196
Bildnachweis . . . . .	196
	195

## Autorenverzeichnis

- Prof. Dr. Rainer Drewello, Institut für Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege, Otto-Friedrich-Universität, Am Kranen 12, D-96045 Bamberg.
- Dipl.-Ing. (FH) Niels Pelzer, Institut für Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege, Otto-Friedrich-Universität, Am Kranen 12, D-96045 Bamberg.
- Dipl.-Geol. Thomas Köberle, Institut für Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege, Otto-Friedrich-Universität, Am Kranen 12, D-96045 Bamberg.
- Dr. Lutz-Michael Dallmeier, Amt für Archiv und Denkmalpflege, Abteilung Denkmalpflege, Neue-Waag-Gasse 2, D-93019 Regensburg.
- Dipl.-Biol. Univ. Ursula Drewello, Labor im GNM GmbH, Kartäusergasse 1, D-90402 Nürnberg.
- Prof. Dr. Roman Koch, Institut für Paläontologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Loewenichstraße 28, D-91054 Erlangen.
- Prof. Dr. Erik Flügel, Institut für Paläontologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Loewenichstraße 28, D-91054 Erlangen.
- Dipl.-Geol. Heinz-Georg Lorenz, Institut für Paläontologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Loewenichstraße 28, D-91054 Erlangen.

## Bildnachweis

- Abb. 1, 5, 6: Luftbildarchiv Regensburg
- Abb. 2: Historisches Museum der Stadt Regensburg
- Abb. 3, 15: Museum Fürst Thurn und Taxis
- Abb. 7–13, 16: Stadtarchiv Regensburg
- Abb. 14, 17–24, 30: Stadtbildstelle Regensburg
- Abb. 25–28: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
- Abb. 29: Uwe Gaasch, Bamberg
- Abb. 31: Architekt Westphal, Karlsruhe
- Abb. 32: Thomas Aumüller, München
- Abb. 33, 34: Octocom AG, ehem. Berlin
- Abb. 35a, 35b: Bayerisches Geologisches Landesamt, München
- Abb. 36, 41, 42, 45, 46: Roman Koch, Erlangen
- Abb. 37: H. Füchtbauer
- Abb. 38, 40: R. K. F. Meyer & H. Schmidt-Kaler
- Abb. 39: R. K. F. Meyer
- Abb. 43, 44: Erik Flügel, Erlangen
- Abb. 47–57: Rainer Drewello, Bamberg
- Abb. 58–73: Rainer Drewello, Bamberg und Ursula Drewello, Nürnberg
- Tafel 1–6: Roman Koch, Erlangen
- Anhang C.1–C.5: Labor in GNM, Nürnberg.