

Geol. Paläont. Westf.	48	185 S.	94 Abb. 11Taf.	Münster April 1997
--------------------------	----	--------	-------------------	-----------------------

Verwitterungsbeständigkeit und Verwitterung von Naturbausteinen aus Kalkstein

Andreas May *

Kurzfassung: Es wurden die Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen verschiedenen Varietäten jeweils eines Kalksteins untersucht. Beprobte Kalksteine des Muschelkalks im Raum Osnabrück-Bielefeld und des Devons im Sauerland in Bauwerken und Aufschlüssen. Eine neue Klassifikation des Verwitterungszustandes von Kalkstein-Mauersteinen wurde entwickelt. Die Oberflächenschäden auf der Außenseite sind nur $\pm$ gering und stellen bloß ein „kosmetisches“ Problem dar. Die Stärke der Schädigung des inneren Zusammenhaltes des Mauersteins durch Risse ist viel wichtiger, da sie die Sicherheit und Stabilität des Bauwerks gefährdet.

Die Untersuchung von Dünnschliffen ermöglichte es, insgesamt 17 Mikrofaziestypen zu definieren und erstmalig Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen den verschiedenen Mikrofaziestypen eines Kalksteins zu erkennen. Kalksteine, die in $\pm$ turbulentem (und damit $\pm$ flachem) Meereswasser abgelagert wurden, sind tendenziell verwitterungsbeständiger als solche aus anderen Ablagerungsräumen. Mit der Auftriebsmethode wurden wichtige Porositätsparameter festgestellt. Freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio (= Quotient freiwillige Wasseraufnahme / effektive Porosität) beeinflussen die Verwitterungsbeständigkeit sehr stark; wenn ihre Größe zunimmt, nimmt die Verwitterungsbeständigkeit ab. Die Ultraschall-Untersuchungen zeigten, daß in Kalksteinen Spannungen viel weiter geleitet werden als in Sandsteinen und deshalb zu (lang aushaltenden) Rissen führen. Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung erlaubte Aussagen über einzelne Aspekte des Verwitterungsprozesses. Die im salzsäurelöslichen Gesteinsanteil gemessenen Element-Konzentrationen spielen keine Rolle für die Verwitterungsbeständigkeit der Kalksteine.

Die Verwitterungsbeständigkeit der bearbeiteten Kalksteine wird am stärksten von freiwilliger Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio beeinflusst. Der Einfluß des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand ist erheblich geringer. Darüber hinaus spielen auch die Merkmale Feinschichtung und Kristallgröße (Mikrit/Sparit) eine gewisse Rolle. Die Entwicklung von Stylolithen hat nur nachrangige Bedeutung. Einen sehr großen praktischen Nutzen für Prognosen über die Verwitterungsbeständigkeit verspricht die erstmalig ermittelte Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme, die unabhängig vom Probenkollektiv überdurchschnittlich und unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Kalkstein-Mauersteine mit ziemlich großer Schärfe voneinander trennt. Darauf aufbauend wurden leicht durchzuführende Verfahren zur Auswahl besonders verwitterungsbeständiger Kalksteine entwickelt.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Andreas May, Geologisch-Paläontologisches Institut der Westfälischen Wilhelms-Universität, Corrensstr. 24, D-48149 Münster; privat: Friedrich-List-Str. 66, D-59425 Unna

Im Gegensatz zur vorherrschenden Literaturmeinung werden Kalksteine im wesentlichen durch Risse geschädigt, die wahrscheinlich aufgrund von Frosterscheinungen (bzw. Frost-Tau-Wechsel-Prozessen) entstehen und hauptsächlich durch Frostsprengung vergrößert werden. Da die Schädigung der Gesteinsoberfläche $\pm$ gering ist, kann die chemische Verwitterung für Kalksteine nicht wichtig sein. Hierdurch unterscheiden sich Kalksteine in ihrem Verwitterungsverhalten sehr stark von Kalksandsteinen.

A b s t r a c t : Weathering durability and weathering process of natural building stones from the Lower Muschelkalk, the Upper Muschelkalk, and the Devonian have been investigated. Various properties of each building stone and its limestone material are measured (microscopy, SEM, porosity, ultrasonic velocity, geochemical methods). Defined microfacies types show clear differences in their weathering durability. The quantities of the cold water absorption, the Schurecht ratio (= ratio cold/boiling water absorption), and the residue insoluble by hydrochloric acid strongly affect the weathering durability. Together with the investigation of thin-sections, these properties enable prognoses about the weathering durability. A diagram of correlation between coldwater absorption and Schurecht ratio is developed, which is able to discriminate more durable and less durable limestones by a boundary line (Fig. 59-60). The limestones are mainly damaged by fissures which harm the unity of the stone. Probably these fissures are mainly based on frost phenomena. Connections between the sedimentary environment and the weathering durability are recognizable: generally limestones of the agitated (shallow) marine are more durable than other limestones.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung	8
1.1. Problemstellung	8
1.2. Bisherige Arbeiten und eigener Ansatz	8
2. Methodik	10
2.1. Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsmethoden	10
2.2. Probennahme	12
2.3. Äußere Begutachtung des Mauersteins	13
2.4. Präparation der Probekörper	16
2.5. Dünnschliffe	17
2.6. Messung von Dichte, Wasseraufnahme und Porosität mit der Auftriebsmethode	19
2.7. Ultraschall-Untersuchungen	21
2.8. Rasterelektronenmikroskopie	21
2.9. Quecksilber-Porosimetrie	22
2.10. Geochemische Untersuchungsmethoden	23
2.11. Verwitterungssimulations-Versuche	24
2.12. Statistische Auswertung und Präsentation	26
3. Untersuchte Natursteine und Probenkollektive	27
3.1. Trochitenkalk von Bielefeld	27
3.1.1. Probenkollektiv S: Burg Sparrenberg	28
3.2. Wellenkalk von Osnabrück	29
3.2.1. Probenkollektiv K: Schwesternhaus der ehemaligen Städtischen Kliniken	29
3.2.2. Probenkollektiv H: Heger Tor	30
3.2.3. Aufschlußaufnahme im Osnabrücker Wellenkalk	30
3.3. Beisinghäuser Kalk (Devon) von Eslohe	31

3.3.1. Probenkollektiv P: Kirche St. Pankratius in Eslohe-Reiste	32
3.3.2. Aufschlußaufnahme im Beisinghäuser Kalk	33
3.4. Oberer Muschelkalk von Oerlinghausen	34
3.4.1. Probenkollektiv E: Evangelisch-reformierte Kirche in Helpup	35
3.4.2. Aufschlußaufnahme im Oberen Muschelkalk bei Helpup	36
4. Ergebnisse der Untersuchung der Probenkollektive	36
4.1. Ergebnisse der äußeren Begutachtung und der Präparation der Mauersteine	37
4.1.1. Gefüge-Index und Grad der Oberflächenschädigung	37
4.1.2. Zusammenhänge zwischen Gefüge-Index und Dimensions-Index des Mauersteins	39
4.1.3. Korrigierter Gefüge-Index	43
4.2. Ergebnisse der Dünnschliff-Untersuchungen	44
4.2.1. Mikrofaziestypen	44
4.2.2. Verwitterungsbeständigkeit der Mikrofaziestypen	67
4.2.3. Entwicklung von sparitverheilten Rissen und Stylolithen	68
4.3. Ergebnisse der Messungen mit der Auftriebsmethode	71
4.4. Ergebnisse der Ultraschall-Untersuchungen	79
4.5. Ergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen	81
4.6. Ergebnisse der geochemischen Untersuchungen	84
4.6.1. Salzsäureunlöslicher Rückstand	84
4.6.2. Salzsäurelöslicher Gesteinsanteil	87
5. Interpretation und Anwendung der Untersuchungsergebnisse	94
5.1. Interpretation der Untersuchungsergebnisse	94
5.1.1. Alleinige Betrachtung der Porositätskennwerte	95
5.1.2. Betrachtung unter Berücksichtigung weiterer Gesteinskennwerte	103
5.2. Auswahl verwitterungsbeständiger Kalksteine	114
6. Zusammenhänge zwischen Sedimentologie und Verwitterungsbeständigkeit	123
6.1. Beisinghäuser Kalk des Devons	124
6.2. Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks	126
6.3. Oberer Muschelkalk des Bielefelder Raums	130
6.4. Allgemeine Trends	131
7. Ursachen und Entwicklung der beobachteten Schäden an den Bausteinen	132
7.1. Literaturdiskussion	132
7.2. Eigene Beobachtungen und Interpretation	134
8. Zusammenfassung und Diskussion	139
9. Dank	142
10. Literaturverzeichnis	143
Tafeln	164

1. Einführung

1.1. Problemstellung

In dieser Zeit, in der zum einen durch die anthropogene Verschmutzung der Luft natürliche Verwitterungsvorgänge drastisch beschleunigt sind, zum anderen aber das öffentliche Interesse an der Erhaltung und Wiederherstellung historischer Bauwerke immer mehr ansteigt, gewinnen Fragen der Denkmalpflege immer größere Bedeutung. Dementsprechend gibt es zahlreiche Forschungsarbeiten über die Verwitterung von Naturbausteinen. Allerdings spielt die Untersuchung von Kalksteinen im Rahmen dieser Forschungsprojekte nur eine untergeordnete Rolle, und der bei der Restaurierung historischer Bauten sehr oft notwendige und sinnvolle Steinaustausch wird meist nicht berücksichtigt.

Wenn im Zuge einer Restaurierung Steinaustausch vorgesehen ist, wird der Bauherr an den Ersatzstein folgende zwei Anforderungen stellen: Er soll einerseits dem auszutauschenden Gestein möglichst weitgehend entsprechen, andererseits aber auch möglichst verwitterungsresistent sein. Die optimale Lösung dieses Problems besteht darin, die verwitterungsbeständigsten Werkstein-Varietäten (bzw. Gesteinsbänke) in der Schichtenfolge herauszufinden, aus der der ursprünglich verwandte Baustein stammt. Daraus ergibt sich die Problemstellung dieses Forschungsprojektes: Zunächst sollen in ausgewählten Fällen die verwitterungsbeständigsten Werkstein-Varietäten herausgefunden werden; danach sollen an diesen Modellfällen allgemeine Prinzipien herausgearbeitet werden, wie sich verwitterungsbeständigere Kalksteine von weniger verwitterungsbeständigen Kalksteinen unterscheiden lassen. Die große Anzahl historischer Bauwerke aus Kalkstein und die daran registrierten Schäden innerhalb und außerhalb der Bundesrepublik Deutschland zeigen die Notwendigkeit dieser Untersuchungen.

1.2. Bisherige Arbeiten und eigener Ansatz

Der methodische Ansatz dieses Forschungsprojektes ergibt sich aus der Erforschungsgeschichte. Um sowohl das Neuartige des Ansatzes als auch seine Notwendigkeit deutlich erkennen zu können, muß deshalb der bisherige Gang der Erforschung der Verwitterung von Natursteinen in Bauwerken kurz dargestellt werden. Dieses ist nicht ganz einfach, da dieses Forschungsgebiet im Schnittpunkt zwischen Geologie, Werkstoffwissenschaften, Architektur, Chemie, Biologie, Meteorologie und Geographie liegt.

Auf eine Literaturdiskussion soll im Rahmen dieses Unterkapitels soweit als möglich verzichtet werden, da zum einen zahlreiche Literaturhinweise und -diskussionen zu speziellen Punkten in den entsprechenden Kapiteln dieser Arbeit gegeben werden (siehe insbesondere Kap. 2. und 7.) und da zum anderen folgende Literatur dazu vorliegt:

- Allgemeine historische Überblicke und Literaturhinweise finden sich in WINKLER (1978) und KONTA (1984: 137-139).
- Einen knappen Überblick über den Forschungsstand in Deutschland liefert MEYER (1992), und speziell mit der Arbeit des Zollern-Institutes beschäftigt sich BRÜGGERHOFF (1991). Die derzeitigen Bemühungen auf europäischer Ebene stellen HAAGENRUD & DAHLIN (1994) vor.
- Eine ausführliche Literaturdiskussion zur Frage der Schwefeldioxid-bedingten Schädigung von Bausteinen verfaßte NIESEL (1979).
- Eine „Bibliographie der deutschsprachigen Literatur zur Verwitterung und Konservierung natürlicher Bausteine“ stellte RIEDERER (1973) zusammen.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts begann die wissenschaftliche Untersuchung von Natursteinverwitterung und -schäden an Bauwerken, geweckt vom allgemein gestiegenen Interesse an der eigenen Geschichte und dem damit verbundenen Interesse an der Erhaltung und Wiederherstellung historischer Bauwerke. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen schlugen sich in einigen Handbüchern nieder, die an den Erfahrungen und Bedürfnissen der bautechnischen Praxis orientiert waren und (zumindest zum Teil) noch heute Bedeutung besitzen - erwähnt seien die Bücher von HIRSCHWALD (1911-1912), POLLACK (1923), KIESLINGER (1932) und SCHAFFER (1932). In diesen Arbeiten spielt die phänomenologische Vorgehensweise - die Beschreibung von Verwitterungsformen und -eigenschaften der verschiedenen Natursteine - eine besonders große Rolle. Diese Tradition wurde auch nach dem 2. Weltkrieg von einigen Arbeiten - wie z. B. DE QUERVAIN (1945) und KIESLINGER (1949) fortgesetzt, daneben spielten aber experimentelle Ansätze eine immer größere Rolle (z. B. HONEYBORNE & HARRIS 1958). Ende der 60er Jahre unseres Jahrhunderts führte ein erneut gestiegenes allgemeines Interesse an der Erhaltung historischer Bausubstanz zusammen

mit einer gesteigerten Sensibilisierung für die verschiedenartigen Auswirkungen der anthropogenen Umweltverschmutzung zu einer weltweiten Intensivierung der Forschungen zur Bausteinverwitterung (siehe z. B.: HERRERO 1967; SCHMIDT-THOMSEN 1969; WINKLER 1973). Schon 1972 wurde das „1er Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre“ in La Rochelle (Frankreich) abgehalten. Seitdem kam es zu einer stetig anwachsenden Zahl von Publikationen und Kongressen zu dieser Thematik. Allerdings ist nur ein kleiner Teil der Veröffentlichungen für die hier untersuchte Problemstellung relevant, denn weltweit – und ganz besonders in Deutschland – liegt der Schwerpunkt der Forschungen auf Sandsteinen und Kalksandsteinen, während Kalksteine sehr stiefmütterlich behandelt werden. Zudem beschäftigen sich die meisten Arbeiten mit Fragen des Verwitterungsprozesses selbst (siehe auch Kap. 7.1.) oder der Steinkonservierung. Als Konsequenz gibt es nur verhältnismäßig wenige Arbeiten, die die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen untersuchen. Sie verwenden folgende methodische Ansätze zur Untersuchung der Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen:

- 1) An frischen Gesteinsproben werden im Labor Verwitterungsprozesse simuliert. Dazu gibt es sehr viele unterschiedliche Verfahren. Ihnen gemeinsam ist, daß ihre Übertragbarkeit auf die Realität heftig umstritten ist und daß sie sehr zeitaufwendig und/oder arbeitsaufwendig sind. Beispiele dafür finden sich in SCHAFFER (1932: 29, 36, 98-105), HARVEY et al. (1974, 1978), CRNKOVIC & KRTOLICA (1976: 187), AIRES-BARROS (1977), HUDEC (1980), LEARY (1981), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 34-46), OZOL (1984), ORDAZ & ESBERT (1985), DERMENTZOPOULOS et al. (1988: 622-627) und CHRISTARAS (1991).
- 2) Freilandversuche unter erschwerten Bedingungen für die Gesteinsproben zur Simulation der Verwitterung am Bauwerk verwenden nur HONEYBORNE & HARRIS (1958: 344-345) und GERARD (1985) zur Bestimmung der Verwitterungsbeständigkeit. Sie dauern sehr lange und die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf die Verhältnisse am Bauwerk ist nicht völlig gesichert.
- 3) Es werden verschiedene Kalksteine mit bekannter, sehr unterschiedlicher Verwitterungsbeständigkeit anhand weniger Proben miteinander verglichen. So lassen sich dann aber auch nur sehr allgemeine Unterschiede feststellen. Als Beispiele dafür seien angeführt: SCHAFFER (1932: 33-36), HONEYBORNE & HARRIS (1958: 349-356), ESBERT et al. (1981), ROBERTSON (1982, 1985), GAURI & CHOWDHURY et al. (1988), GUERRERO et al. (1988) und DUTTLINGER & KNÖFEL (1989).

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, die bisher noch nicht bekannten Unterschiede der Verwitterungsbeständigkeit zwischen verschiedenen Varietäten eines Kalksteins zu erkennen, zu erklären und schließlich vorherzusagen. Da sich dieses Ziel mit den drei oben aufgeführten methodischen Ansätzen aus den dort angeführten Gründen nicht sinnvoll durchführen läßt, ist eine völlig neue Methodik notwendig. Einen Ansatzpunkt lieferte KAEVER (1988), der das Augenmerk auf die Unterscheidung von Mikrofaziestypen legte und hoffte, so Unterschiede in der Verwitterungsresistenz erkennen zu können. Von KAEVER (1988) wurde nicht dargelegt, wie Zusammenhänge zwischen Mikrofaziestyp und Verwitterungsbeständigkeit erforscht werden können. Bis jetzt wurde das Konzept von KAEVER (1988) von KETTELHACK (1988, 1992) und HILBERT (1991) in die Praxis umgesetzt. HILBERT (1991) untersuchte den Soester Grünsandstein und konnte keine Zusammenhänge zwischen Verwitterungsbeständigkeit und Mikrofaziestyp erkennen; allerdings konnte er feststellen, daß die Verwitterungsbeständigkeit von Glaukonit-Häufigkeit und -Zusammensetzung, Packungsdichte, SiO_2 -Anteil und innerer Oberfläche des Gesteins beeinflusst wird. KETTELHACK (1988, 1992) untersuchte hauptsächlich den Baumberger Sandstein und unterschied dort mehrere Mikrofaziestypen. Allerdings konnte KETTELHACK (1992: 93) nur bei einem von vier Mikrofazies-Haupttypen einen Zusammenhang zwischen der Art der Verwitterung und der mikrofazialen Ausbildung erkennen. Die Ergebnisse von KETTELHACK (1988, 1992) und HILBERT (1991) sind also nicht sehr befriedigend. Das mag zu einem Teil daran liegen, daß sie Kalksandsteine und nicht Kalksteine untersuchten; denn Kalksandsteine (typische Vertreter: Baumberger Sandstein und Soester Grünsandstein) unterscheiden sich von Kalksteinen durch ihre Sandsteinen vergleichbaren Gefüge- und Porenraum-Eigenschaften und ihren höheren Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (ca. 5-25 % Quarz und ca. 5-30 % Tonminerale). Außerdem ist die Mikrofazies oft weniger differenziert als bei Kalksteinen. Wesentlicher für ihre Ergebnisse dürften aber folgende Punkte ihrer Methodik sein:

- Die Proben wurden an mehreren Bauwerken auf mehreren Seiten an unterschiedlichen Stellen entnommen (HILBERT 1991: 9; KETTELHACK 1992: 2).
- Der Verwitterungszustand des Mauersteins wurde nur anhand der Oberflächenschädigung bestimmt (HILBERT 1991: 23-25; KETTELHACK 1992: 31-32).
- Es wurden keine ganzen Mauersteine, sondern nur Bohrkerne und Handstücke untersucht (HILBERT 1991: 9; KETTELHACK 1992: 2).

Diese Prüfung des Ansatzes von KAEVER (1988) und seiner Adaption von KETTELHACK (1988, 1992) und HILBERT (1991) zeigt, daß er in der vorliegenden Form nicht geeignet ist, die Problemstellung dieser Arbeit zu lösen. Es ist also ein neuer, darauf aufbauender methodischer Ansatz notwendig. Dieser neue Ansatz

muß die Schwächen der vorherigen Ansätze vermeiden und Rücksicht darauf nehmen, daß man bei einem Vergleich zwischen verschiedenen Varietäten eines Kalksteins damit rechnen muß, daß die Unterschiede gering und die Streubreiten ziemlich groß sind. Er lautet:

Gegenstand der Untersuchungen sind Kalkstein-Mauersteine aus den Außenmauern von steinsichtigen Gebäuden, die schon eine lange Zeit der Verwitterung ausgesetzt waren; denn so ist - im Gegensatz zu Verwitterungssimulations-Versuchen und Freiland-Versuchen unter erschwerten Bedingungen - gesichert, daß die Ergebnisse auf die Realität am Bauwerk übertragbar sind. Um Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen verschiedenen Varietäten eines Kalksteins erkennen zu können, ist es notwendig, ein möglichst umfangreiches Probenkollektiv zu untersuchen, das von einem Standort mit einheitlicher Verwitterungsexposition und Bauwerks-Geschichte stammt. Für die Bestimmung des Verwitterungszustands wird nicht nur die Oberfläche der Mauerstein-Außenseite, sondern der gesamte Mauerstein berücksichtigt. An Proben aus dem Kern jedes Mauersteins werden möglichst viele potentiell verwitterungsrelevante Gesteinsparameter erfaßt. Die durch die Untersuchung des Probenkollektivs erhaltenen Informationen sollen - wenn möglich - durch Aufschlußaufnahmen am Herkunftsort der Steine ergänzt werden, um so die verwitterungsbeständigsten Werkstein-Varietäten (bzw. Gesteinsbänke) herauszufinden. Durch die Anwendung dieser Methodik auf mehrere verschiedene Kalksteine lassen sich allgemeine Prinzipien der Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen herausarbeiten. Das Flußdiagramm (Abb. 1) stellt die Arbeitsschritte des Forschungsprojektes dar. Es zeigt, daß sich über die Auswahl verwitterungsbeständiger Kalksteine hinaus unsere Kenntnis der Ursachen und der Entwicklung der beobachteten Schäden vertiefen läßt. Sämtliche Erkenntnisse kommen der Restaurierung historischer Bauwerke (direkt oder indirekt) zugute.

2. Methodik

2.1. Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsmethoden

Da es das Ziel dieser Untersuchungen ist, die Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit verschiedener Varietäten eines Kalksteins zu erfassen und zu interpretieren, war von Anfang an klar, daß es notwendig sein würde, große Mengen an Material mit einer Reihe von Methoden möglichst genau zu charakterisieren. Diese Methoden sollen deshalb folgende Eigenschaften haben:

- Die Anwendung aller Untersuchungsmethoden soll zum einen eine möglichst genaue Bestimmung des Verwitterungszustands erlauben und zum anderen eine möglichst umfassende Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften des (unverwitterten) Ausgangsgesteins liefern. Denn erst dadurch lassen sich Zusammenhänge zwischen Ausgangsgestein und Verwitterungszustand erkennen.
- Die Methoden sollen eine Differenzierung innerhalb eines Probenkollektivs ermöglichen und unabhängig vom Bearbeiter reproduzierbare Ergebnisse liefern.
- Die Methoden sollen nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen liefern, die sich statistisch auswerten lassen (z. B. in Korrelationsdiagrammen).
- Die Methoden sollen ohne großen Aufwand durchführbar sein; denn zum einen muß eine große Menge Material untersucht werden, zum anderen sind die personellen, finanziellen und zeitlichen Möglichkeiten im Rahmen dieses Forschungsprojektes eng begrenzt.
- Die Methoden sollen soweit als möglich mit relativ einfachen technischen Mitteln durchgeführt werden können, da die diesbezügliche Ausstattung des Institutes, in dem dieses Projekt stattfindet, und benachbarter Institute nicht immer völlig ausreichend ist. Außerdem wird dadurch interessierten Kollegen die Möglichkeit gegeben, auch bei einer bescheidenen technischen Ausstattung vergleichbare Untersuchungen durchführen zu können. [Diese Einschränkung schließt viele in den letzten Jahren entwickelte Untersuchungsmethoden aus, da diese sehr spezielle und aufwendige technische Apparaturen erfordern. Als Beispiele können die von GRASSEGGGER (1992) knapp dargestellten Methoden und die von KRUS & KIESSL (1991), MELLO et al. (1982) und STORCH & TUR (1991) angewandten Methoden gelten.]
- Die Methoden sollten schon erprobt und in der Literatur diskutiert worden sein, um die Grenzen ihrer Anwendung und eventuelle Fehlerquellen abschätzen zu können. Einen Überblick über verbreitete Methoden liefern z. B. DIN 52100, MEISEL (1988), MAMILLAN (1988), REINSCH (1991: 260-279) und FITZNER, HEINRICHS & KOWNATZKI (1993a: 44-46).

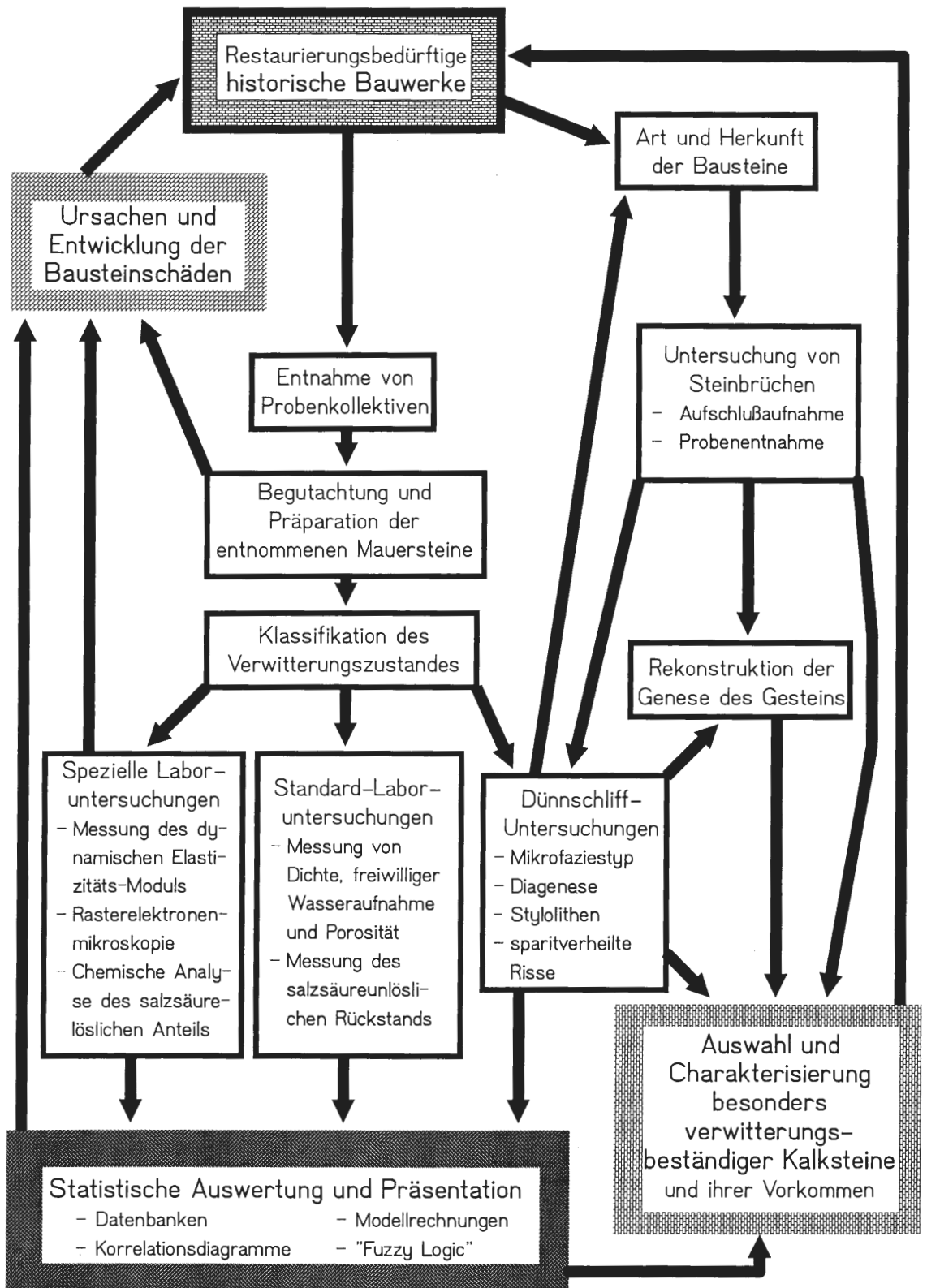


Abb. 1: Flußdiagramm des Vorgehens im vorliegenden Forschungsprojekt. Ausgangspunkt der Arbeiten sind historische Bauwerke. Die Ergebnisse der Forschung dienen ihrer sachgerechten Restaurierung.

2.2. Probennahme

Um die Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit verschiedener Varietäten eines Kalksteins zu erfassen, ist die sinnvollste Vorgehensweise, möglichst viel Material von einem Standort mit einheitlicher Verwitterungsexposition und Geschichte zu untersuchen. Dieses Material bildet ein Probenkollektiv. Bei der Auswahl eines Standorts, von dem ein Probenkollektiv entnommen werden soll, muß folgendes beachtet werden:

- Da die Reaktion des Gesteins auf die Verwitterungsagenzien (Luft, Wasser, Temperaturschwankungen usw.) erfaßt werden soll, ist es notwendig, daß der zu untersuchende Mauerstein ihnen unvermittelt ausgesetzt war. Deshalb kommen für die Untersuchungen nur Außenflächen in Frage, die seit ihrer Errichtung steinsichtig sind oder einen früheren Putz schon vor langer Zeit verloren haben.
- Da die Wetterbedingungen in verschiedenen Himmelsrichtungen sehr unterschiedlich sind (Windrichtungen, Insolation usw.) (siehe z. B.: REICHEL 1975: 22-43; KIESLINGER 1932: 16-18; SCHWARZ 1986: 80-86, 170-175; LUKAS 1990: 68-72; SIMPER 1991: 31-34; AMOROSO & FASSINA 1983: 156-175; MÜLLER & SCHWAIGHOFER et al. 1990) und der Wasserhaushalt der Mauer (-oberfläche) sehr stark von architektonischen Gegebenheiten abhängig ist (siehe z. B.: ZEHNDER 1982: 27-65; SCHWARZ 1986: 92-100; DE QUERVAIN 1967: 194-196; MEISEL 1988: 41-42; CAMUFFO et al. 1982; NIESEL 1986a), ist es notwendig, das gesamte Material eines Probenkollektivs aus einem einheitlich orientierten Abschnitt einer Mauer zu entnehmen, der nicht durch Gesimse oder Pfeiler untergliedert ist.
- Da nicht selten ungewöhnliche, starke Schäden bei gemeinsamem Einbau sehr unterschiedlicher Baustein-Typen (z. B. Kalkstein und Sandstein oder Dolomitstein) auftreten (siehe z. B.: SCHAFFER 1932: 22-25; HAUCK 1992: 282), dürfen nur Mauerteile beprobt werden, in die neben dem Kalkstein keine (oder nur wenige) andersartigen Mauersteine eingebaut wurden.
- Um Verfälschungen der Ergebnisse aufgrund einer unterschiedlich langen Expositionsdauer verschiedener Mauersteine eines Probenkollektivs zu vermeiden, muß gewährleistet sein, daß am zur Beprobung in Frage kommenden Mauerteil kein Steinaustausch erfolgt ist, weiterhin, daß bei der Errichtung dieses Teils keine schon früher verwandten Steine eingebaut wurden und daß ein früher aufgetragener Putz nicht stückweise im Laufe einer langen Zeit abgefallen ist. Dazu müssen Erkundigungen über die Bauwerksgeschichte eingezogen und der in Frage kommende Mauerteil auf entsprechende Hinweise (wie z. B.: Putzreste, unterschiedliche Bearbeitung der Mauersteine, auffällige Unterschiede in Aussehen und Erhaltung zwischen verschiedenen Partien) geprüft werden.
- Die Proben sollten aus einem Mauerteil entnommen werden, der mit Sicherheit oberhalb des Wirkungsbereichs der aufsteigenden Grundfeuchte liegt; denn im Bereich der Grundfeuchte erfolgt eine viel stärkere Schädigung des Gesteins (siehe z. B.: KIESLINGER 1932: 30-43; DE QUERVAIN 1945: 7-8, 1967: 195; KESSLER 1960; REICHEL 1975: 51; ZEHNDER 1982: 48; AMOROSO & FASSINA 1983: 19-20), deren Erscheinungsbild zudem noch durch Salzsäuren (siehe z. B.: WINKLER 1973: 126-129; ARNOLD & ZEHNDER 1984; SCHWARZ 1986: 153-178) und durch die Lage der Obergrenze des Kapillarsaums (siehe z. B.: DE QUERVAIN 1945: 8; KESSLER 1960: 4; BLASCHKE & JULING 1990, 1992) kompliziert wird.
- Es sollte vermieden werden, daß das Probenkollektiv einem Mauerteil entnommen wird, in dem an verschiedenen Stellen unterschiedliche Mörtel verwandt wurden. Zum einen ist die Verwendung unterschiedlicher Mörtel ein Hinweis auf nachträglichen Steinaustausch, zum anderen weist FRANK (1983: 319) auf die große Bedeutung der chemischen Zusammensetzung des Mörtels für die Haltbarkeit des Mauerwerks hin.
- Auf dem zu beprobenden Mauerteil dürfen keine Anstriche sein oder Steinschutzstoffe angewandt worden sein, da diese das Verwitterungsverhalten des Gesteins beträchtlich verändern können.
- Es muß darauf geachtet werden, daß im zu beprobenden Mauerteil keine Metallteile aus Kupfer oder Kupferlegierungen der Verwitterung ausgesetzt sind; denn GRIMM (1992: 253) konnte nachweisen, daß bei der Korrosion dieser Metallteile biozid wirkende Kupferlösungen entstehen, die die Verschmutzung des Steins verhindern und die Verwitterung der Gesteinsoberfläche vermindern.

Bei einem Probenkollektiv, das von einem Standort entnommen wird, der die oben aufgelisteten Forderungen erfüllt, sollte man davon ausgehen können, daß sämtliche Unterschiede im Verwitterungszustand der Mauersteine auf spezifischen Unterschieden in primären Parametern des Gesteins beruhen (vgl. Kap. 4.1.2.). Wenn man möglichst zuverlässige Aussagen über die primären Gesteinsparameter eines Mauersteins erlangen will, muß man einen möglichst wenig (oder gar nicht) verwitterten Teil im Mauerstein suchen. Während KETTELHACK (1988) bei der Untersuchung des Baumberger Kalksandsteins dazu die Rückseite des jeweiligen Mauersteins beprobte, werden bei den hier untersuchten Kalksteinen die Proben aus dem Kern des Steins entnommen; denn auch die in der Mauer befindlichen Seiten des Steins zeigen oft an der Oberfläche Verwitterungsspuren, die möglicherweise durch im - erheblich poröseren - Fugenmörtel zirkul-

lierendes Wasser hervorgerufen werden. Da außerdem im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen auch die Tiefenwirkung der Verwitterung interessiert, ist es notwendig, ganze Mauersteine zu entnehmen. Die - mit berechtigter Rücksichtnahme auf denkmalpflegerische Belange - oft praktizierte Entnahme von Bohrkernen (siehe z. B.: EFES 1980: 79; ZEHNDER 1982: 19; MEISEL 1988: 96-98; FALLER, KAROTKE & ALTHAUS 1988: 165; DUTTLINGER & KNÖFEL 1989; LUKAS 1990: 136; SATTLER et al. 1990; HILBERT 1991; LUKAS 1991: 97; ROHATSCH 1991: 144; KETTELHACK 1992: 2; FITZNER & HEINRICHS 1993: 67, 70) reicht für diese Untersuchungen nicht aus.

Für die Entnahme eines Probenkollektivs kommen Kirchen oder $\pm$ große Profanbauten in Frage, deren Außenwände überwiegend oder vollständig aus Kalkstein aufgebaut sind und bei denen im Zuge von Renovierungsmaßnahmen eine größere Anzahl Mauersteine ausgetauscht wird. Zum einen ist aber für eine sinnvolle statistische Auswertung eine gewisse Anzahl (mindestens 15-20) Mauersteine notwendig und zum anderen werden neben auszutauschenden „kranken“ Steinen auch „gesunde“ Steine für die Untersuchungen benötigt. Da aber aus Gründen der Authentizität und der Denkmalpflege die Erhaltung der Originalsubstanz historischer Gebäude eine sehr hohe Priorität besitzt (siehe z. B.: WIHR 1986: 8-10; MEISEL 1988: 69-74; SAUDER & WIESEN 1987; WOLFF 1978), ist es schwierig, geeignete Objekte zu finden. Eine bessere Möglichkeit zur Entnahme eines Probenkollektivs bietet sich beim (mehr oder weniger seltenen) Abriß eines Gebäudes, das genügend alt ist (mindestens 50-100 Jahre) und an dem Außenwände die oben geforderten Kriterien erfüllen.

Bei der Probennahme wird festgehalten, wo das Probenkollektiv entnommen worden ist, welche Orientierung die Mauer hat, wie hoch über der Erdoberfläche die Entnahmestelle liegt und welche Besonderheiten das Mauerwerk aufweist. Jeder entnommene Mauerstein wird mit einem wasserunlöslichen Stift unverwechselbar nummeriert. Darüberhinaus muß aber auch gekennzeichnet werden, welche Seite des Steins die den Atmosphären ausgesetzte Außenseite ist und wie die Orientierung des Steins im Mauerwerk war. Dadurch läßt sich feststellen, ob der Mauerstein mit horizontal liegender Schichtung (= lagerhaft) oder senkrecht stehender Schichtung (= auf Spalt) eingebaut wurde. Da auf Spalt eingebaute Mauersteine oft weitergehend verwittert und stärker geschädigt sind als vergleichbare lagerhaft verbaute (siehe z. B.: SCHAFFER 1932: 14-15; KIESLINGER 1949: 379-380; REICHEL 1975: 47; KNÖFEL 1980: 100; STEIN 1981: 7; REINSCH 1991: 281), kann dieser Umstand für die statistische Auswertung sehr wichtig werden.

Die oben beschriebene Probennahme am Gebäude sollte durch Probennahme im Steinbruch ergänzt werden, um die am Gebäude unterschiedlich verwitternden Gesteinstypen in der stratigraphischen Abfolge wiederzuerkennen und damit gegebenenfalls Hinweise für den restaurativen Steinaustausch liefern zu können. Deshalb sollte bei der Auswahl eines Gebäudes zur Entnahme eines Probenkollektivs berücksichtigt werden, ob der Steinbruch bekannt ist, in dem die Mauersteine gebrochen wurden, und ob dieser oder ein vergleichbarer Steinbruch noch zugänglich sind.

2.3. Äußere Begutachtung des Mauersteins

Zuerst werden bei jedem entnommenen Mauerstein Länge, Tiefe und Höhe festgestellt. Die Definitionen dieser Dimensionen lassen sich in der nebenstehenden Schemazeichnung (Abb. 2) erkennen. Da die Mauersteine normalerweise aber nicht regelmäßig quaderförmig sind, wird jeweils die größte Erstreckung gemessen.

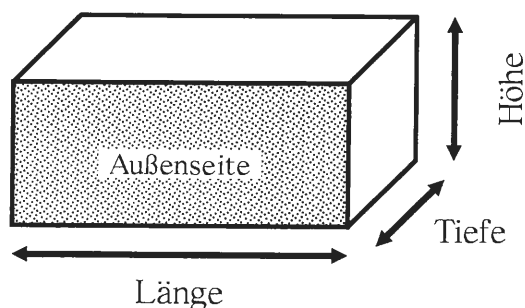


Abb. 2: Dimensionen eines Mauersteins.

Danach wird erfaßt, wie weitgehend der Mauerstein vom Steinmetz vor dem Einbau bearbeitet wurde. Es zeigt sich nämlich immer wieder, daß unterschiedliche Bearbeitungen von Werksteinen unterschiedliches Verwitterungsverhalten nach sich ziehen können - siehe z. B.: SCHAFFER (1932: 17-19), REICHEL (1975: 46-47), GRUNERT (1978: 88), KNÖFEL (1980: 100), ALESSANDRINI et al. (1981) und GRIMM (1983: 47, 51-52; 1984: 523-524; 1986a: 435). Eine Übersicht über die verschiedenen, von Steinmetzen durchgeführten Oberflächen-Bearbeitungstechniken von Werksteinen liefern WIHR (1986: 33-38) und MEISEL (1988: 140-142).

Außerdem wird der Zustand der Oberfläche der Außenseite aufgenommen. Zur Beschreibung oberflächennaher Verwitterungs- und Verschmutzungserscheinungen an Naturbausteinen ist eine differenzierte Terminologie entwickelt worden, über die ZEHNDER (1980; 1982: 26-27, 66-89), GRIMM (1984: 531-534), WIHR (1986: 55-59), SAUDER & WIESEN (1987: 12-19), BEEGER (1988), KATZSCHMANN (1989: 3, Anlage 2), FITZNER & KOWNATZKI (1991a), FITZNER & HEINRICHS & KOWNATZKI (1995), EICKELBERG et al. (1990: 12) und LUKAS (1990: 41-42) moderne Überblicke geben. Viele dieser Erscheinungen treten nur bei Sandsteinen und Kalksandsteinen auf, während für die hier untersuchten Kalksteine nur die nachstehend aufgeführten eine Rolle spielen:

- Bleichung: Das Gestein auf der Außenseite ist in den obersten (= äußersten) Millimetern deutlich heller gefärbt als das unverwitterte Gestein im Kern des Mauersteins. Diese Verwitterungserscheinung tritt schon relativ früh auf und führt zu keiner nennenswerten Qualitätseinbuße des Mauersteins, sondern stellt als Patina häufig den besonderen Reiz von Kalkstein-Bauwerken dar.
- Reliefbildung: Unter Reliefbildung wird im folgenden - ebenso wie auch von FITZNER & KOWNATZKI (1991a: 3) und EICKELBERG et al. (1990: 12) - eine Form der Rückverwitterung der Außenseite des Mauersteins verstanden, bei der es zur Ausprägung einer unebenen Oberfläche kommt, die (heute) fest ist. Die von EICKELBERG et al. (1990: 12) vertretene Meinung, daß in diesen Fällen aufgrund der festen Oberfläche heute kein Materialverlust auftritt, wird vom Verfasser in Bezug auf dichte Kalksteine bezweifelt, da man hier mit einem Materialabtrag durch chemische Lösung rechnen muß. Hinweise auf eine chemische Lösungsverwitterung sind die beiden beobachteten Typen der Reliefbildung: Mikrokarst und pockennarbiges Aussehen. Beim Mikrokarst zeigt die Oberfläche senkrecht und parallel zur Schichtung verlaufende Lösungsrinnen im Millimeter-Bereich analog zu den Karren und Schratten des Karstes. Mikrokarst tritt bevorzugt bei komponentenarmen mikritischen Kalken auf. Demgegenüber ist ein pockennarbiges Aussehen (FITZNER & KOWNATZKI 1991a: 4) der Gesteinsoberfläche für komponentenreiche Kalke typisch. Je nachdem, ob die Komponenten mehr oder weniger verwitterungsbeständig als die Matrix sind, wittern sie heraus oder bilden Hohlformen.
- Kruste: „Auf der Steinoberfläche haftende oder sich ablösende Schicht, meist deutlich in Farbe und Gefüge vom Stein abweichend; entstanden durch chemische Ausfällungen, Depositionen von Ruß und Staubpartikeln und/oder Abbauprodukten von Mikroorganismen, z. T. unter Einbeziehung der obersten Kornlagen des Steins“ (EICKELBERG et al. 1990: 12). Verbreitet treten auf den Kalksteinen mehr oder weniger dünne, durch Ruß und Staubpartikel schwarz gefärbte Krusten auf. Die Untersuchung ihrer chemischen Zusammensetzung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen - es ist davon auszugehen, daß sie ebenso wie andere beschriebene schwarze Krusten auf Kalksteinen (siehe z. B.: SEEGER 1968: 48; FASSINA, LAZZARINI & BISCONTINI 1976; CAMUFFO et al. 1982: 2254; AMOROSO & FASSINA 1983: 145-146, 148; FASSINA 1988a, b, 1992; AIRES-BARROS & ALVES 1988; AIRES-BARROS & ALVES et al. 1990: 128; BUTLIN et al. 1988: 248; BÖKE et al. 1992; FELIX & MARAVELAKI 1992; ROSSI-MANARES, TUCCI & GRILLINI 1992: 569; MENTLER, MÜLLER & SCHWAIGHOFER 1986; DE QUERVAIN 1945: 23-24) hauptsächlich aus Gips, wiederausgeschiedenem Kalzit und Verbrennungsrückständen (Ruß u. a.) bestehen [nur GORETZKI, SEIDEL & STEINER (1987: 71) beschreiben eine etwas anders zusammengesetzte schwarze Kruste]. Vereinzelt werden helle Sinterkrusten beobachtet; vermutlich wurde das in ihnen ausgeschiedene Kalziumkarbonat aus dem Mörtel herausgelöst, wie es auch DE QUERVAIN (1945: 32) beschreibt und DELGADO RODRIGUES & ISABEL PRUDÊNCIO (1992: 1389-1391) annehmen.
- Absanden: Es handelt sich um einen Materialverlust in Form von einzelnen Körnern, die sich auch beim Berühren der Oberfläche ablösen, so daß sich diese sandig oder mehlig anfühlt. Da im Untersuchungsmaterial die beim Absanden entstehenden Körner mit bloßem Auge nicht mehr sichtbar sind, könnte man es - GRIMM (1984: 533) und LUKAS (1990: 41) folgend - auch als Abmehlen bezeichnen. Es tritt nicht häufig auf und kommt nur unter sich ablösenden schwarzen Krusten und in der Nähe davon vor - was auch GORETZKI, SEIDEL & STEINER (1987: 74) beobachteten.

Da die Oberflächenschäden und -veränderungen an den Außenseiten der untersuchten Kalksteine nicht sehr vielfältig sind, bot es sich an, ein einfaches Schema zu ihrer Quantifizierung zu entwickeln. Es unterscheidet vier Grade der Oberflächenschädigung, die mit zunehmender Schadensstärke aufeinander folgen:

- 1) Oberfläche der Außenseite des Mauersteins nicht angewittert. Keine Reliefbildung. Keine Kruste.
- 2) Oberfläche leicht angewittert, gegebenenfalls mit geringfügiger schwarzer Kruste. Das Relief beträgt nicht mehr als ca. 1 mm Tiefe. Etwaige auftretende schwarze Krusten bedecken maximal 20 % der Außenseite und sind mehr oder weniger dünn und fest. Das Gestein zeigt normalerweise Bleichung.
- 3) Entweder ist die Oberfläche stark angewittert (mehr als 1 mm Relief) mit geringfügiger bis fehlender schwarzer Kruste, oder die Oberfläche ist leicht angewittert mit starker Krustenbildung. Starke Krustenbildung bedeutet: mindestens 20 % der Außenseite sind von einer schwarzen Kruste bedeckt, die schwarze Kruste ist stellenweise dick und neigt zur Ablösung, oft verbunden mit dem Absanden des darunterliegenden Gesteins.
- 4) Oberfläche stark angewittert und starke Krustenbildung. (Dieser Schädigungsgrad ist hypothetisch und wurde im Untersuchungsmaterial nicht beobachtet.)

Sehr schnell stellte sich heraus - was immer wieder im Gespräch mit Architekten und örtlichen Denkmalpflegern bestätigt wurde -, daß die Oberflächenverwitterung bei den untersuchten Kalksteinen keine nennenswerte Gefahr für den Mauerstein darstellt. Erheblich gefährlicher sind Risse, die den inneren Zusammenhalt des Mauersteins gefährden. Obwohl nur sehr selten in der Literatur auf zerstörerische Rißbildungen in Kalksteinen hingewiesen wird (KIESLINGER 1932: 113; DE QUERVAIN 1945: 19-21, 42-43; HUDEC 1978a: 3-4; KNÖFEL 1980: 102; MARSCHNER in KLEMM 1980: 137; WIHR 1986: 56-58), handelt es sich offensichtlich um eine bei Kalksteinen weitverbreitete Erscheinung. Um dieses Phänomen statistisch zu erfassen, ist - ebenso wie bei den Oberflächenschäden - eine quantitative Klassifikation notwendig. Obwohl in der Literatur eine Fülle von Klassifikationen für den Verwitterungszustand von Naturbausteinen beschrieben werden, erwies sich keine als geeignet:

- Die Klassifikation von HIRSCHWALD (1911: 334-344) quantifiziert zwar die Schwere der Schädigung in einer sechsstufigen Skala, orientiert sich aber sehr an den Verhältnissen bei Sandsteinen und erfaßt nur die Veränderungen an der Oberfläche und im oberflächennahen Bereich. Ihre Kriterien - Ausmaß und Tiefe des oberflächlichen Substanzverlustes sowie die Stärke der Gesteinsauflockerung im oberflächennahen Bereich - sind in dieser Weise nicht auf das hier bearbeitete Material anwendbar.
- Auch das von MEISEL (1988: 92) vorgeschlagene Bewertungsraster orientiert sich an der Oberflächenverwitterung von Sandsteinen und vergleichbaren Gesteinen; es unterscheidet die vier Kategorien Festigkeit, Absanden, Abblättern und Durchfeuchtung mit jeweils fünf Schweregraden (A-E).
- Von FITZNER & KOWNATZKI (1989, 1991a) [siehe auch: EICKELBERG et al. (1990: 6-12); FITZNER & HEINRICHS (1993); FITZNER, HEINRICHS & KOWNATZKI (1993a, b; 1995)] wurde im Rahmen des BMFT-Projektes „Steinzerfall“ ein Klassifikationsschema der Verwitterungsformen von Natursteinen entwickelt. Da es für die Kartierung am sanierungsbedürftigen Gebäude entwickelt wurde, berücksichtigt es nur das Erscheinungsbild der Außenseite des Mauersteins und ist deshalb zur Klassifizierung des inneren Zusammenhaltes nicht geeignet. Aber auch zur quantitativen Erfassung der Oberflächenschäden an den hier untersuchten Kalksteinen ist seine Anwendung nicht sinnvoll; denn es unterscheidet viele verschiedene Schadenstypen, bei denen in der Intensität nur zwischen den Graden schwach-(mittel)-stark grob differenziert wird. Vergleichbares gilt für ein von SCHWARZ (1986: 159-169) entwickeltes Klassifikationsschema für Schäden durch Salzausbildungen im Sockelbereich von Gebäuden sowie für ein von GRIMM (1986b: 58) und LUKAS (1990: 106-108) zur Erfassung der Schäden an Grabsteinen benutztes Verwitterungs-Formblatt.
- Für den von MIRWALD (1987b: 218-220) ausgearbeiteten Schadenskatalog gilt ähnliches wie für die Klassifikation von FITZNER & KOWNATZKI (1989, 1991a). Er listet die Schadenstypen an der Mauerstein-Außenseite beim Baumberger Kalksandstein und beim Ruhrsandstein auf und versucht, die Bedeutung des jeweiligen Schadenstyps mit leicht-mittel-schwer zu bewerten.
- Die von HILBERT (1991: 22-25) entwickelte Phänomenologisch-Qualitative Verwitterungsklassifizierung unterscheidet nach der Verwitterungstiefe (von 0 bis >2,5 cm) auf der Mauerstein-Außenseite sechs Verwitterungsklassen. HILBERT (1991: 23) weist darauf hin, daß sie nur auf den Soester Grünsandstein (von Soest) angewandt werden darf und nicht einmal auf den stratigraphisch äquivalenten (Soester) Grünsandstein von Anröchte uneingeschränkt übertragen werden kann.
- DÜPPENBECKER & FITZNER (1991: 40) charakterisierten den Verwitterungszustand von Kalkstein-Figuren aus der Ost-Türkei anhand ihrer Oberflächenstruktur. Sie konnten neun Verwitterungsformklassen anhand der Häufigkeit, Breite und Tiefe von an der Oberfläche offenen Klüften unterscheiden. Obwohl dies die einzige Klassifikation ist, die bisher für Kalksteine entwickelt wurde, ist sie nicht auf das hier untersuchte Material übertragbar, da sich eine vergleichbare Entwicklung der Oberflächenstruktur im hier untersuchten Material nicht beobachten läßt.
- KUPPER & PISSART (1974), GRIMM & VÖLKL (1983) und AIRES-BARROS, MAURÁCIO & FIGUEIREDO (1991) entwickelten Methoden, die Oberflächenrauigkeit ursprünglich polierter (oder zumindest angeschliffener) Gesteins-Oberflächen zu messen. Dieses Verfahren wurde auch von KUPPER (1975), JAYNES & COOKE (1987) und SIMPER (1991: 127-129) angewandt. Der Grundgedanke ist hierbei, daß mit

- zunehmender Verwitterung die Oberflächenrauigkeit zunimmt. Die Anwendung dieser Methode war in der vorliegenden Arbeit nicht möglich, da die Oberflächen der untersuchten Kalksteine nicht angeschliffen oder poliert waren. Außerdem gibt diese Methode nur Auskünfte über oberflächliche Verwitterungsprozesse. Die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit kann sowieso als einer der unbedeutendsten Naturstein-Schäden gelten, da sie weder zu einer Entfestigung des Gesteins noch zu einer schnellen Zerstörung ornamentaler Strukturen führt (wie es z. B. durch Schuppenbildung oder Abbröckeln erfolgt).
- Die von ALFES, BREIT & SCHIESSL (1992) beschriebene Methode, den Verwitterungszustand anhand der Entfestigung der oberflächennahen Bereiche festzustellen, indem die Eindringtiefe eines kugelförmigen Testkörpers bei einer bestimmten Gewichtslast gemessen wird, ist auf die untersuchten Kalksteine nicht anwendbar, da es bei ihnen - im Gegensatz zu Sandsteinen und Kalksandsteinen - nicht zu einer nennenswerten Entfestigung der oberflächennahen Bereiche im Laufe der Verwitterung kommt.
 - Ingenieurgeologische Klassifikationen – wie z. B. die von FOOKES, DEARMAN & FRANKLIN (1971) – sind in ihren Kategorien viel zu grob und zu sehr an den Verwitterungsbedingungen in der Natur (Felsen, Boden) orientiert.

Um beurteilen zu können, wie groß der innere Zusammenhalt eines Mauersteins ist, wird er zuerst gewaschen. Dann wird protokolliert, wie häufig sich Risse auf den Oberflächen aller Mauerstein-Seiten beobachten lassen, wie gut sie entwickelt sind (Breite und Länge der Risse) und wie sie zueinander angeordnet sind. Zuerst war beabsichtigt, diese Daten differenziert statistisch auszuwerten. Es zeigte sich aber sehr schnell, daß das Zusammenwirken dieser Punkte sehr komplex ist - wenige lange und breite Risse können den inneren Zusammenhalt des Mauersteins stärker gefährden als viele kurze schmale Risse. Deshalb wird schließlich als Synthese der Beobachtungen abgeschätzt, wie stark der innere Zusammenhalt des Mauersteins gefährdet ist und einem Schweregrad zugeordnet. Folgende Grade der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes werden in dieser Arbeit unterschieden:

- 1) Frischer Mauerstein mit ungefährdetem Gesteinszusammenhalt (soll nur für mehr oder weniger frisch gebrochenes Gestein eines betriebenen Steinbruchs verwandt werden).
- 2) Gesteinszusammenhalt nicht gefährdet (wird verwandt bei Mauersteinen aus alten Bauwerken).
- 3) Gesteinszusammenhalt wenig gefährdet.
- 4) Gesteinszusammenhalt stark gefährdet.
- 5) Gesteinszusammenhalt sehr stark gefährdet.
- 6) Gestein ist schon in einzelne Stücke zerfallen oder zerfällt weiter.

Natürlich ist diese Klassifikation subjektiv und deshalb noch unbefriedigend. Der Verfasser kennt aber keine bessere Möglichkeit der Klassifikation, zumal die „objektive“ Methode der Messung des dynamischen Elastizitäts-Moduls keine brauchbaren Ergebnisse erbrachte (siehe Kap. 4.4.). Als Beispiele für die verwandten Klassifikationen sind auf den Tafeln 2 und 3 einige Mauerstein-Außenseiten abgebildet.

2.4. Präparation der Probekörper

Da das Ziel der Arbeit in der Aufdeckung der Zusammenhänge zwischen primären Gesteinsparametern und jetzigem Verwitterungszustand des Mauersteins liegt, ist für die weiteren Untersuchungen nicht der am meisten verwitterte, sondern der möglichst wenig verwitterte Teil des Mauersteins wichtig. Wie schon im Kapitel 2.2. erwähnt, zeigen die entnommenen Mauersteine oft auch auf den eingemauerten Flächen leichte, aber deutliche Verwitterungsspuren (Bleichung und beginnende Reliefbildung). Deshalb werden die für die weiteren Forschungen benötigten Proben dem Kern des Mauersteins entnommen. Dazu wird der Mauerstein parallel zur Außenseite in drei Scheiben zersägt, und aus dem Mittelteil der mittleren Scheibe werden - je nach Größe des Mauersteins - drei bis vier Probenwürfel von 4-5 cm Kantenlänge herausgesägt, die dann zur Dünnschliff-Herstellung und für die verschiedenen physikalischen Untersuchungsmethoden verwandt werden. Diese Größe der Würfel ergibt sich aus verschiedenen Gründen:

- Für die Messung des Volumens und der Trockenrohdichte nach dem Auftriebs-Verfahren (siehe Kap. 2.6.) empfiehlt DIN 52102 (8/1988: 3) geometrisch einfache Probekörper von gedrungener Form, die „in allen Richtungen Maße von mindestens 40 mm haben.“ Außerdem ist es für diese und die anderen Untersuchungen nach dem Auftriebsverfahren sinnvoll, immer möglichst gleichartige Probekörper zu untersuchen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu sichern.
- Für die Herstellung von 5x5-cm-Dünnschliffen (Standardformat für Karbonate) werden Probenwürfel mit einer Seitenlänge von etwas weniger als 5 cm benötigt, da die Probe etwas kleiner als der Objekträger sein muß.

- Für bestimmte Methoden sind größere, geometrisch einfache Probekörper - wie z. B. Quadern von 10 cm Länge - erforderlich oder zumindest wünschenswert. Leider stellte sich sehr schnell heraus, daß es nicht möglich ist, allen Mauersteinen so große Probekörper aus möglichst unverwittertem Gestein zu entnehmen, da viele Mauersteine zu klein und/oder von zu vielen Rissen durchzogen sind. Gerade die interessantesten Mauersteine - es sind die am meisten geschädigten - würden fehlen! Es erwies sich schon als schwierig genug, 3-4 Probenwürfel von 4-5 cm Kantenlänge aus jedem Mauerstein zu gewinnen.

Das Verhalten des Mauersteins beim Zersägen in Scheiben und beim Formatieren in Probenwürfel wird protokolliert. Die Feststellung, ob und in welchem Umfang der Stein beim Sägen bzw. Formatieren zerfällt, läßt Rückschlüsse auf den inneren Zusammenhalt des Mauersteins zu. Zur statistischen Erfassung werden vier Grade der Schädigung bei der Präparation unterschieden:

- 1) Keine Schäden beobachtet.
- 2) Leichte Schäden: Mauerstein ist beim Sägen in 2-3 Teile zerfallen oder 1 Probenwürfel ist beim Formatieren zerbrochen.
- 3) Mäßige Schäden: Mauerstein ist beim Sägen in mehrere Teile zerfallen oder mehrere Probenwürfel sind beim Formatieren zerbrochen oder beide Indikationen für 2) (leichte Schäden) treten kombiniert auf.
- 4) Starke Schäden.

Für sich alleine genommen ist diese Klassifikation noch nicht sehr aussagekräftig, denn die Mauersteine werden bei der Präparation nicht gleich behandelt und deshalb auch nicht gleich beansprucht. So hängt es z. B. von der Größe des Mauersteins ab, auf welcher Steinsäge er gesägt wird und ob beim Sägen automatischer oder manueller Vortrieb erfolgt. Trotzdem erlaubt der Grad der Schädigung bei der Präparation wichtige Rückschlüsse, wenn man ihn zusammen mit dem Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes (siehe Kap. 4.1.1.) betrachtet.

2.5. Dünnschliffe

Von jedem der Mauersteine wird einer der formatierten Probenwürfel ausgewählt, um einen Dünnschliff senkrecht zur sedimentären Schichtung zu erstellen. Die Orientierung senkrecht zur Schichtung ist sehr wichtig, da nur sie klare Aussagen zu Textur und Variabilität des Gesteins erlaubt. Daher darf auch die Fläche des Dünnschliffs nicht zu klein sein. Deshalb und aus technischen Gründen (5x5 cm ist eine Standardgröße bei Objektträgern und anderen Gläsern [= Dia-Format]) sind 5x5-cm-Dünnschliffe ein Standardformat in Karbonatpetrographie und Mikrofazies-Analyse. Bei der Dünnschliffherstellung wird die angeschliffene Seite der Probe mittels eines Kunstharzes auf die aufgerauhte Seite des Objektträger-Glases geklebt. Danach wird die Probe bis auf eine dünne Scheibe abgesägt. Schließlich wird die aufgeklebte Probe mit Hilfe einer Maschine (Fabrikat Logitech) bis auf ca. 60 µm Dicke abgeschliffen. Die Dicke dieser Dünnschliffe ist zwar doppelt so groß wie die mineralogischer Dünnschliffe, aber diese große Dicke ist notwendig, um Gefüge und Mikrofazies des Kalksteins gut erkennen zu können (FLÜGEL 1982: 8). Die Dünnschliffe werden nicht mit Deckgläsern oder Lack abgedeckt, um Anfärben oder weiteres Abschleifen zu ermöglichen.

Die fertigen Dünnschliffe werden in der von FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) beschriebenen Weise halbseitig angefärbt (senkrecht zur Schichtung), so daß man immer originales Gestein und angefärbtes Gestein miteinander vergleichen kann. Für diese Färbung werden folgende Lösungen benötigt:

Lösung A: 1 g Kalium-Hexacyanoferrat-III gelöst in 100 cm³ n/8 HCl (instabil).

Lösung B: 0,1 g Alizarin-Rot S gelöst in 100 cm³ n/8 HCl.

Lösung C: 40 cm³ Lösung A vermischt mit 60 cm³ Lösung B (instabil).

Die Dünnschliffe werden zuerst 45 Sekunden in Lösung C getaucht, dann 15 Sekunden in Lösung B getaucht und schließlich vorsichtig gewässert. Erst nach dem Trocknen des Dünnschliffs ist die Färbung soweit fixiert, daß der gefärbte Teil vorsichtig berührt werden darf. Durch diese Färbung werden Kalzit (je nach Eisengehalt) rot bis blau und eisenhaltiger Dolomit blaugrün gefärbt, während (eisenfreier) Dolomit und Silikate nicht gefärbt werden. Diese Färbemethode erlaubt also zum einen die Unterscheidung von Kalzit und Dolomit und zum anderen eine Abschätzung des Eisengehaltes. LINDHOLM & FINKELMAN (1972) und FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) unterscheiden mit zunehmendem Eisengehalt (± eisenfreien) Kalzit (rot; < 0,3 Gew.-% FeO), Fe-I-Kalzit (rotviolett), Fe-II-Kalzit (blauviolett) und Fe-III-Kalzit (blau; > 2,5 Gew.-% FeO).

Während sich dank dieser Färbung der Kalzit sicher erkennen läßt, muß die Unterscheidung zwischen

Dolomit und den ebenfalls in Kalksteinen verbreiteten Mineralen Quarz und Feldspat anhand morphologischer und interferenzoptischer Kriterien erfolgen. Dafür steht ein Polarisationsmikroskop zur Verfügung.

Die Dünnschliffe werden mit einem Binokular (Typ Wild M7 S) einer Mikrofazies-Analyse unterzogen (FLÜGEL 1982): Zuerst werden Komponenten und Matrix qualitativ und quantitativ erfaßt. Auf dieser Basis erfolgt dann eine Einordnung in die beiden am häufigsten verwandten Gliederungsschemata für Kalksteine: die FOLK-Klassifikation und die durch EMBRY & KLOVAN erweiterte DUNHAM-Klassifikation (siehe z. B.: FLÜGEL 1982: 367-375; FÜCHTBAUER & RICHTER 1988). Außerdem wird die Diagenese der Kalksteine näher untersucht (siehe dazu z. B.: CHILINGAR, BISSELL & WOLF 1979; FLÜGEL 1982). Schließlich werden in einer Zusammenschau aller Dünnschliffe aus einer stratigraphisch-räumlichen Einheit (d. h. aller Dünnschliffe aller Probenkollektive, die aus demselben lokalen Naturstein bestehen) verschiedene Mikrofaziestypen gegeneinander abgegrenzt. Diese $\pm$ willkürliche Unterscheidung von Mikrofaziestypen ist einer Einordnung in die Standardmikrofaziestypen von WILSON (1975: 63-69) vorzuziehen, denn mit einer $\pm$ willkürlichen Unterscheidung läßt sich differenzierter auf den Einzelfall eingehen. Demgegenüber liegt der Vorteil von WILSON's Standardmikrofaziestypen darin, daß sie für bisher noch nicht entsprechend untersuchte Gesteinsabfolgen erste Rückschlüsse auf Genese und Paläogeographie zulassen. Es besteht aber hier keine Notwendigkeit dafür, da zu diesen Aspekten der untersuchten Kalksteine eine umfangreiche weiterführende Literatur vorliegt. Außerdem gibt es genügend Mikrofaziestypen (z. B. im Osnabrücker Wellenkalk), die sich nicht leicht in das Schema von WILSON (1975) einordnen lassen. Die Typisierung und Analyse der Mikrofazies kann Informationen zu folgenden Fragen geben:

- Wie kann man die Gesteine sinnvoll in Gruppen gliedern und wiedererkennen? Die Zugehörigkeit verschiedener Proben zu einem Mikrofaziestyp belegt eine in vieler Hinsicht vergleichbare Zusammensetzung, Genese und Geschichte des Kalksteins. Deshalb bietet sich die Gliederung in Mikrofaziestypen als natürliches System an, um Proben gleichen und vergleichbaren Gesteins zu erkennen.
- Woher kommt das im Bauwerk verwandte Material? Die Mikrofazies-Analyse liefert sehr viele charakteristische Merkmale, die durch Vergleich Aussagen darüber erlauben, von welchem Vorkommen das Baumaterial stammt. Beispiele für die Anwendung zur Klärung der Herkunft liefern ROHATSCH (1991) und ROSSI-MANARESI, TUCCI & GRILLINI (1992: 566-569).
- Welche Ablagerungs- und Diagenese-Bedingungen beeinflussen die Verwitterungsbeständigkeit des Kalksteins? Die Mikrofazies-Analyse ist die einzige Methode, die detaillierte Aussagen über die Ablagerungs- und Diagenese-Bedingungen liefert. Eine Kenntnis derartiger Zusammenhänge würde Prognosen über die Verwitterungsbeständigkeit anderer Kalksteine erleichtern. Schon KAEVER (1988) erwähnte diese Nutzungsmöglichkeit der Mikrofazies-Analyse und KETTELHACK (1988, 1992) wandte sie auf oberkretazische Kalksandsteine an.
- Welche Kalksteine sind als besonders verwitterungsbeständig zu empfehlen und wo finden sie sich? Ein durch seinen Mikrofaziestyp charakterisiertes und als besonders verwitterungsbeständig erkanntes Gestein kann anhand dieses Mikrofaziestyps immer wieder bestimmt und zugeordnet werden. Man kann also auch feststellen, wo es in einem Steinbruch vorkommt und somit Hinweise geben, aus welcher Gesteinsbank neue Bausteine (für den Steinaustausch) gewonnen werden sollten.

Trotz dieser Vorzüge können Probleme bei der Zuordnung der Proben auftreten:

- Im hier angewandten Verfahren wird von jedem Mauerstein ein Dünnschliff erstellt. Das Bild (= der Mikrofaziestyp) dieses Dünnschliffs repräsentiert nicht unbedingt die gesamte Variationsbreite der Mikrofazies in diesem Mauerstein. Ein unglücklich gewählter Dünnschliff kann (insbesondere bei kleinen Probenkollektiven) zu Verfälschungen des Gesamtbildes führen. Ein möglicher Ausweg wäre, jeden Mauerstein durch mehrere Dünnschliffe zu dokumentieren. Da aber die Herstellung (und die Auswertung) von Dünnschliffen ziemlich zeitaufwendig ist, ist dieser Weg nicht gangbar.
- Für die Mikrofazies-Analyse wird viel Erfahrung benötigt. Andernfalls kann es zu Fehlinterpretationen kommen.
- Um die oben beschriebenen Möglichkeiten voll ausnutzen zu können, ist also ein gründliches Studium der Literatur zu den untersuchten Kalksteinen notwendig.

Über den Rahmen einer normalen Mikrofazies-Analyse hinaus wird bei allen Dünnschliffen die Entwicklung von Stylolithen und sparitverheilten Rissen erfaßt. Stylolithen und Risse sind Schwächezonen im Gestein, die möglicherweise einen Einfluß auf die Verwitterungsbeständigkeit – insbesondere den Gesteinszusammenhalt – haben. Die Erfassung der Risse beschränkt sich auf jene, die nachträglich wieder durch Sparit verheilt sind, denn alle im Dünnschliff offenen (= mit Kunstharz gefüllten) Risse können Artefakte der Präparation sein. Für die Entwicklung von Stylolithen und sparitverheilten Rissen werden einander vergleichbare Grade der Entwicklung verwandt:

- 1) Keine Stylolithen (bzw. sparitverheilten Risse).
- 2) Stylolithen (bzw. sparitverheilte Risse) selten und schwach entwickelt.

- 3) Stylolithen (bzw. sparitverheilte Risse) gelegentlich, mäßig entwickelt.
- 4) Stylolithen (bzw. sparitverheilte Risse) häufig, stark entwickelt.

Während die Probenkollektive K und S zu einem wichtigen Teil aus mikritischen Kalken bestehen, umfaßt das Probenkollektiv P nur arenitische Kalke (Rudstones, Grainstones und Packstones). Deshalb bietet es sich beim Probenkollektiv P an, zu untersuchen, ob die Korngröße arenitischer Kalke ihre Verwitterungsbeständigkeit beeinflusst. Dazu wird an jedem Dünnschliff von ihm der Median der Korngröße abgeschätzt (= 50%-Perzentile der Summenkurve) (FLÜGEL 1978: 179; 1982: 192).

2.6. Messung von Dichte, Wasseraufnahme und Porosität mit der Auftriebsmethode

Wichtige Gesteinsparameter, die zur Charakterisierung eines Gesteins und seiner Verwitterungsbeständigkeit immer wieder herangezogen werden, sind Trockenrohdichte, effektive Porosität und Sättigungswert. Die DIN 52102 (8/1988: 2) definiert die Trockenrohdichte von Naturstein als den Quotienten aus der Trockenmasse und dem Volumen einschließlich etwa vorhandenen Porenraumes. Die effektive Porosität ist die Summe aller untereinander in Verbindung stehender Porenhohlräume (= offene Poren), d. h. aller Hohlräume im Gestein, die von Gasen, Wasser oder einer anderen Flüssigkeit erreicht werden können. Oft wird die effektive Porosität nicht klar von der Gesamtporosität unterschieden (vgl. z. B.: FITZNER 1988: 18). Die Gesamtporosität ist die Summe aller Poren, der miteinander verbundenen und der unverbundenen (= geschlossenen) Poren (DIN 52102 8/1988: 2; MIRWALD 1987a: 959). Deshalb läßt sich die Gesamtporosität nur durch Pulverisieren (DIN 52102 8/1988) oder chemisches Analysieren des Gesteins (WEISS & SCHELLHORN 1989) feststellen. Da beide Methoden sehr aufwendig sind und es sehr fraglich ist, ob die geschlossenen Poren verwitterungsrelevant sind, wird auf eine Messung der Gesamtporosität verzichtet.

Die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck bei Raumtemperatur (18-28 °C) wird hier ebenso wie z. B. in FITZNER (1970, 1988) als freiwillige Wasseraufnahme bezeichnet, um sie eindeutig gegen andere Formen der Wasseraufnahme (kapillar, in kochendem Wasser, unter Druck, im Vakuum) abzugrenzen. Der Sättigungswert (= S-Wert) eines Steins ist das Verhältnis der Wasseraufnahme bei Lagerung in Wasser unter Atmosphärendruck (bis zur Massenkonstanz) zur Wasseraufnahme nach 24 Stunden Lagerung in Wasser, das unter einem Überdruck von 150 bar steht (DIN 52103 10/1988).

Die Angaben, wie lange die Probe im Wasser unter Atmosphärendruck lagern muß, sind in der Literatur nicht einheitlich. Die DIN 52103 (10/1988: 2) verlangt eine Lagerung bis zur Massenkonstanz. Diese Forderung mag in der Theorie richtig sein, ist aber in der Praxis unsinnig; denn die Gesteinsproben nehmen auch noch nach mehreren Wochen durch weitere Wasseraufnahme an Gewicht zu, selbst wenn diese Gewichtszunahme verhältnismäßig gering ist (siehe z. B.: FITZNER 1970: 103-110; FITZNER 1988; KRULL 1990: 26). Deshalb geht KRAUS (1985: 30) so pragmatisch vor, die Gewichtszunahme nach 24 Stunden Lagerung in Wasser unter Atmosphärendruck zu messen - wie es auch in Großbritannien (ROSS, HART & BUTLIN 1991: 103) und den USA üblich ist. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, daß LEARY (1981: 85) keinen signifikanten Unterschied zwischen der Wasseraufnahme nach 24 Stunden und der nach 48 Stunden finden konnte. Auch ROSS, HART & BUTLIN (1991: 103) weisen darauf hin, daß sich der Wert der Wasseraufnahme nach 24 Stunden nicht sonderlich von dem Wert nach 48 Stunden unterscheidet, da das meiste Wasser innerhalb der ersten 24 Stunden aufgenommen wird.

Dem S-Wert wird eine große Bedeutung zur Prüfung der Frostbeständigkeit von Bausteinen zugemessen (siehe z. B.: HIRSCHWALD 1911; NIESEL & SCHIMMELWITZ 1982; DIN 52106 11/1972). Das beruht auf folgender Überlegung: Die Wasseraufnahme unter 150 bar Überdruck entspricht der effektiven Porosität, während die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (freiwillige Wasseraufnahme) den unter den Bedingungen im Bauwerk füllbaren Teil des Porenraumes zeigt. Da Wasser beim Gefrieren sein Volumen um 9 % vergrößert, sind Gesteine, in denen ≥ 90 % der effektiven Porosität bei Atmosphärendruck von Wasser erfüllt wird - das ist ein S-Wert von $\geq 0,9$ -, durch Frostsprengung gefährdet. Da der Grad der Füllung der einzelnen Gesteinsporen variiert, kann erst bei allgemeiner Füllung des Porenraumes unter 70-80 % (= S-Wert 0,7-0,8) das Gestein als frostbeständig gelten (DE QUERVAIN 1967: 185; DIN 52106 11/1972; KRAUS 1988: 145). Von diesen Überlegungen ausgehend, gibt es eine lange und breite Diskussion über die Aussagekraft des S-Wertes für die Verwitterungsbeständigkeit von natürlichen und künstlichen Bausteinen (siehe z. B.: HIRSCHWALD 1911; SCHAFFER 1932: 49-50; HONEYBORNE & HARRIS 1958: 346; NIESEL 1982: 86; NIESEL & SCHIMMELWITZ 1982: 11-14; LANGER 1989: 65).

Für die Messung des S-Wertes wird ein Autoklav zur Erzeugung von 150 bar Überdruck benötigt. Da so ein Gerät nicht am Geologisch-Paläontologischen Institut vorhanden ist, mußte nach vergleichbaren Methoden Ausschau gehalten werden:

- Im „Saturation Coefficient“ des UNESCO/RILEM (1978c) Test N° II.1 wird die Wasseraufnahme nach 48 Stunden Lagerung unter Atmosphärendruck durch die Wasseraufnahme im Vakuum dividiert. Da EFES (1980: 80-81), der die Wasseraufnahme unter Vakuum mit der unter 150 bar Überdruck verglich, bei verschiedenen Gesteinen erhebliche Unterschiede beobachten konnte, bestehen Bedenken, dieses Verfahren anzuwenden.
- Von der American Society for Testing and Materials (ASTM) wird die dem Sättigungswert ähnliche „Schurecht ratio“ in mehreren Normen zur Prüfung poröser Baustoffe verwandt. Die Schurecht-Ratio ist das Verhältnis zwischen der Wasseraufnahme nach 24 Stunden Lagerung in 15,5-30 °C warmem Wasser und der Wasseraufnahme nach 5 Stunden Lagerung in kochendem Wasser (beides unter Atmosphärendruck) (siehe: NIESEL & SCHIMMELWITZ 1982: 13; MARUSIN 1985: 674; WEST 1970: 107). Dahinter steht das Modell, daß nach mehrstündiger Lagerung in kochendem Wasser alle miteinander verbundenen Poren von Wasser erfüllt sind. Das Modell wird unter anderem dadurch bestätigt, daß die mit Hilfe der Quecksilber-Posimetrie bestimmten effektiven Porenvolumina von drei Sandsteinen gut mit den entsprechenden Werten nach fünfstündigem Kochen übereinstimmen. [Freundliche mündliche Mitteilung von Herrn Dr. Karl Stoppek-Langner, Anorganisch-Chemisches Institut der Universität Münster, vom 24.10.1991]. Diese Methode ist mit einfachen technischen Möglichkeiten durchführbar und wird häufig angewandt (siehe z. B.: WEST 1970: 107-108; ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS 1977; ROBINSON 1984; MARUSIN 1983, 1985; KRULL 1990: 25-26). Die Nützlichkeit der Schurecht-Ratio wurde unter anderem von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977) und ROBINSON (1984) herausgestellt.

Aus den dargelegten Gründen wurde hier die Trockenrohddichte nach dem Verfahren RE der DIN 52102 (8/1988: 3-4) und die effektive Porosität sowie die Schurecht-Ratio nach den ASTM-Normen bestimmt. Obwohl DIN 52102 und DIN 52103 je Gesteinsvarietät mindestens 5 Proben fordern, konnten aufgrund der großen Anzahl und geringen Größe der Mauersteine nur jeweils zwei Probenwürfel von einem Mauerstein dieser Prozedur unterzogen werden. Folgendes Vorgehen hat sich dabei als zweckmäßig erwiesen:

Zuerst werden die 200-300 g schweren Probenwürfel (Größe und Herstellung siehe Kap. 2.4.) in einem Trockenschrank bei 110 °C mehrere Tage lang bis zur Massenkonstanz getrocknet, auf Raumtemperatur abgekühlt und auf einer Präzisionswaage auf 0,01 g genau gewogen (= Trockengewicht). Dann werden die Probenwürfel 24 Stunden unter vollständiger Wasserüberdeckung gelagert. Danach werden die Proben dem Wasser entnommen, mit einem feuchten Tuch abgetupft und erneut auf 0,01 g genau gewogen (= Naßgewicht). Jetzt wird auch das Volumen mittels der Auftriebsmethode festgestellt. Da im Institut keine Präzisionswaage mit einer Einrichtung zum Wiegen unter Wasser vorhanden ist, wird folgendermaßen vorgegangen: Auf die Waage wird ein mit Wasser gefülltes Becherglas gestellt, in das der mit einer Zange festgehaltene Probenwürfel sofort nach der Messung des Naßgewichts eingetaucht wird. Durch das Eintauchen kommt es zu einer Gewichtserhöhung, die mit dem Gewicht des durch Probe und Zange verdrängten Wassers identisch ist. Nach Abzug des Gewichts des von der Zange verdrängten Wassers erhält man das Gewicht des von der Probe verdrängten Wassers - auf 0,1 g genau -, das dem Volumen der Probe entspricht. Schließlich wird die Probe fünf Stunden lang unter Wasserbedeckung gekocht. Danach läßt man sie in diesem Wasser auf Raumtemperatur abkühlen, entnimmt die Probe, tupft sie mit einem feuchten Tuch ab und wiegt sie auf 0,01 g genau (= Kochgewicht). Die gewünschten Gesteinsparameter lassen sich aus diesen Messungen nach folgenden Formeln errechnen:

$$\text{Trockenrohddichte (in g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Trockengewicht}}{\text{Gewicht des von der Probe verdrängten Wassers}}$$

$$\text{freiwillige Wasseraufnahme (in Vol.-%)} = \frac{\text{Naßgewicht} - \text{Trockengewicht}}{\text{Gewicht d. v. d. Probe verdrängten Wassers}} \times 100$$

$$\text{effektive Porosität (in Vol.-%)} = \frac{\text{Kochgewicht} - \text{Trockengewicht}}{\text{Gewicht d. v. d. Probe verdrängten Wassers}} \times 100$$

$$\text{Schurecht-Ratio} = \frac{\text{freiwillige Wasseraufnahme}}{\text{effektive Porosität}} = \frac{\text{Naßgewicht} - \text{Trockengewicht}}{\text{Kochgewicht} - \text{Trockengewicht}}$$

2.7. Ultraschall-Untersuchungen

Es gibt verschiedene, in publizierten Untersuchungen erprobte Methoden, die mit Ultraschall-Impulsen zerstörungsfrei Informationen über den Zustand des Natursteins oder Baustoffs gewinnen wollen:

- Messung der Schwächung der Intensität von Ultraschall-Impulsen. Damit kann man einzelne, festigkeitsmindernde Fehlstellen des Steins nachweisen. VOLKWEIN (1980) beschreibt das Verfahren ausführlich.
- Messung des dynamischen E-Moduls (= Elastizitäts-Modul) mit dem Impulslaufzeit-Verfahren. Dieses Verfahren wird ausführlich von KNÖFEL & SCHUBERT (1990: 12-13) beschrieben. Seine einfache Handhabbarkeit hat dazu geführt, daß es ziemlich häufig verwandt wird (siehe z. B.: FITZNER 1970: 143-154; UNESCO/RILEM 1978d; ACCARDO et al. 1981: 248-250; ZEZZA 1981; DELGADO RODRIGUES 1982; FRANK 1981: 145-147; GEMBAL 1985; MAZUREK 1985; QUEISSER, PLATEN & FÜRST 1985; FITZNER 1988: 19; MAMILLAN 1988: 461-462; FITZNER & KOWNATZKI 1989: 24-25; LUKAS 1990: 191-193; LUKAS 1991: 97; DÜPPENBECKER & FITZNER 1991; CHRISTARAS 1991).
- Messung des dynamischen E-Moduls mit dem Resonanzfrequenz-Verfahren oder mit dem Grindo-Sonic. Auch diese Verfahren werden ausführlich von KNÖFEL & SCHUBERT (1990: 12-14) beschrieben. Sie sind aber technisch aufwendiger und setzen mehr Erfahrung beim Anwender voraus. WEISS (1992) wendet das Grindo-Sonic-Verfahren an.

Für die in diesem Forschungsprojekt behandelten Fragen ist das von VOLKWEIN (1980) beschriebene Verfahren (Messung der Intensitätsschwächung) nicht interessant, da man davon ausgehen kann, daß alle zu untersuchenden Steine Risse zeigen. Es ist in diesem Rahmen auch nicht wichtig zu wissen, wo sie liegen. Wichtig ist nur, zu erfahren, wie stark der Gesteinszusammenhalt gefährdet ist. Wenn man die Arbeitshypothese akzeptiert, daß große, zum Steinzerfall führende Risse aus mikroskopisch kleinen Rissen entstehen, kann man annehmen, daß Häufigkeit und Entwicklung der Mikrorisse mit abnehmendem Gesteinszusammenhalt zunehmen. Mit zunehmender Häufigkeit und Entwicklung der Mikrorisse sollten aber die Ultraschallimpuls-Geschwindigkeit und somit auch der dynamische E-Modul (= Elastizitäts-Modul) abnehmen. Diese Beobachtung konnte DELGADO RODRIGUES (1982) bei thermisch erzeugten Rissen machen, analoge Feststellungen finden sich aber auch andernorts (vgl. z. B.: DE QUERVAIN 1967: 185; CRNKOVIC & KRTOLICA 1976: 189-191; PESCHEL 1977: 79-81; ACCARDO et al. 1981: 249, 253; CASSARO et al. 1982: 64-68; MIRWALD 1987a: 954-955; SAGE 1988; KÖHLER 1988: 659-660; FITZNER & KOWNATZKI 1989: 24; STORCH & TUR 1991: 193; CHRISTARAS 1991: 23; VALDEÓN et al. 1992; WEISS 1992: 72-78). Nach dieser Hypothese wäre zu erwarten, daß die Messung des dynamischen E-Moduls mittels des Impulslaufzeit-Verfahrens eine objektive und präzise Messung des Gesteinszusammenhaltes erlaubt.

Dankenswerterweise durfte ich die Messung des dynamischen E-Moduls mit dem Impulslaufzeit-Verfahren im Laboratorium für Baustoffe der Fachhochschule Münster durchführen. Es wurde das Pundit-Impulslaufzeit-Meßgerät verwandt. Sein Sender und sein Empfänger wurden an einander parallel gegenüberliegenden Flächen der Probenwürfel angelegt. Als Kontaktmittel diente BLR-Sonic Ultraschall-Gel. Von jedem Mauerstein wurden die beiden Probenwürfel untersucht, an denen auch die Untersuchungen mit der Auftriebsmethode erfolgt waren. An jedem Probenwürfel wurde eine Messung parallel und eine Messung senkrecht zur sedimentären Schichtung durchgeführt. Die Länge des Probenwürfels in der gemessenen Richtung wurde auf 0,05 cm genau bestimmt, die Impulslaufzeit auf 0,1 µsec genau.

2.8. Rasterelektronenmikroskopie

Die Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop erlaubt sehr detaillierte Aussagen über die Beschaffenheit von Oberflächen und Hohlräumen (an Bruchflächen). Eine kurze Einführung in Theorie und Praxis der Naturstein-Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop liefert U. SCHWARZ (1990). Zur Charakterisierung von Gesteinen wurden z. B. von FITZNER & SNETHLAGE (1982: 98-99), WIHR (1986: 63-69), MÜLLER (1987: 404-406), FITZNER (1988: 16, 27-29, 41-49), KERTÉSZ (1988: 759-760), POSCHLOD & GRIMM (1988: 817), BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988b: 765-767), GRIMM (1990) und FITZNER & KOWNATZKI (1991b) (künstlich erzeugte) Bruchflächen rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Mit dem Rasterelektronenmikroskop lassen sich aber auch Aspekte der Gesteinsverwitterung (sowie anderer Schädigungen und Konservierungsverfahren) erkennen, interpretieren und dokumentieren - Beispiele liefern PELLERIN (1976: 73-76), LEWIN & CHAROLA (1978, 1981), EFES (1980: 89), AMOROSO & FASSINA (1983: 84-88), MENTLER et al. (1985: 217-225; 1986: 314-323), NIESEL (1986a: 18-20), BLASCHKE (1986, 1988, 1989), BLASCHKE & JULING (1990, 1992), SCHWARZ (1986: 183-193, 205-212), WIHR (1986: 66-

67), FEDDEMA & MEIERDING (1987: 153-155), GORETZKI, FÜTING & KÖHLER (1987: 106-107), KÖHLER (1988: 654), KRUMBEIN & SCHÖNBORN-KRUMBEIN (1987a: 18-20), GORALCZYK et al. (1988), THEOU-LAKIS & MOROPOULOU (1988: 92, 96), BORTOLASO et al. (1988: 106-107), WINKLER (1988: 719), NIJS, DE GEYTER & FOBE (1988: 112), BUTLIN et al. (1988: 248, 254), FASSINA (1988a, 1992), ROSS et al. (1989: 374-376), KATZSCHMANN (1989: 132-135), WEISS & GRIMM (1990), LUKAS (1990: 150-161), HILBERT (1991: 45-61), DRAGOVICH (1991: 130), KRUMBEIN & WARSCHIED (1992: 276), ADAM (1992), ALESSANDRINI & BOCCI et al. (1992), SEBASTIAN PARDO et al. (1992), BÖKE et al. (1992), DELGADO RODRIGUES & ISABEL PRUDÊNCIO (1992), KETTELHACK (1992: 4, 69-73), MCGEE (1992), VENDRELL-SAZ & GARCIA-VALLES (1992), WEISS (1992), WHALLEY et al. (1992) und GAURI, TAMBE & CANER-SALTİK (1992: 58-61). MARUSIN (1983, 1985) untersuchte mit dem Rasterelektronenmikroskop die Zusammenhänge zwischen der Mikrostruktur und der Verwitterungsbeständigkeit von gebrannten Ziegeln. Die DIN 52100 ([Teil 2] 11/ 1990: 2-3) empfiehlt die Anwendung des Rasterelektronenmikroskops zur gesteinskundlichen Untersuchung ausdrücklich. Die am Rasterelektronenmikroskop erzielten Aussagen sind allerdings qualitativer Art und lassen sich nicht leicht quantifizieren. Das erklärt, warum diese Methode zwar in vielen publizierten Untersuchungen, aber meist nur an wenigen Proben angewandt wurde. Trotzdem wurde versuchsweise diese Methode an einigen Proben getestet.

Die Untersuchungen wurden an einem im Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Münster aufgestellten Rasterelektronenmikroskop der Marke Cambridge Stereoscan 250 Mk 2 durchgeführt. Aus dem Inneren eines Mauersteins wurde eine ca. 20-60 mm² große Probe herausgebrochen, die mit Leit-C auf einem Probenhalter befestigt wurde. Diese geringe Größe der Proben ist technisch bedingt (so ist z. B. die Größe der Probenhalter ein wichtiger limitierender Faktor). Da die Ergebnisse der lichtmikroskopischen und geochemischen Untersuchungen zeigten, daß auf eine Element-Analyse mit dem energiedispersiven System verzichtet werden konnte, wurden sämtliche Proben mit Gold besputtert. Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung erfolgte mittels des Sekundärelektronen-Bildes, da sich in ihm die Oberflächenstrukturen besser erkennen lassen als im Rückstreuелеktronen-Bild.

2.9. Quecksilber-Porosimetrie

Während mit dem oben geschilderten Verfahren (siehe Kap. 2.6.) die effektive Porosität nur insgesamt erfaßt werden kann, erlaubt die Quecksilber-Porosimetrie unter Umständen sehr detaillierte Angaben zur Größe der Poren und zur Häufigkeit der verschiedenen Porengrößen. Deshalb wird diese Methode oft in der modernen Literatur angeführt bzw. angewandt, wie z. B. von FITZNER (1970: 87-93), RAUSCHENFELS (1970), HOUPERT et al. (1978: 193-194), TABASSO (1978), ROBERTSON (1982, 1985), NIESEL (1982), ZEHNDER (1982: 23), FITZNER & SNETHLAGE (1982, 1983), ROBINSON (1984), KRAUS (1985: 22-34), ORDAZ & ESBERT (1985: 95-97), MIRWALD (1987a: 959-961; 1987b), BORTOLASO et al. (1988), FALLER et al. (1988), FITZNER (1988: 16-17, 30-65), GAURI & CHOWDHURY et al. (1988), KÖHLER (1988), MAMILLAN (1988: 459-460), POSCHLOD & GRIMM (1988), DUTTLINGER & KNÖFEL (1989: 99), CLEMENS, GRIMM & POSCHLOD (1990), LUKAS (1990: 176-180), PUNURU et al. (1990), DÜPPENBECKER & FITZNER (1991: 42-44), HILBERT (1991: 7, 98-108), LUKAS (1991), RENSCH (1991: 274-275), SCHOLTEN et al. (1991), FITZNER & KOWNATZKI (1991b: 113-117), GAURI, TAMBE & CANER-SALTİK (1992: 56), ALESSANDRINI & BOCCI et al. (1992), SEBASTIAN PARDO et al. (1992: 32-34), WEISS (1992: 19), FRANKE & BENTRUP (1993b: 532-535), FITZNER & HEINRICHS (1993: 72-73), FITZNER, HEINRICHS & KOWNATZKI (1993b: 16-19), GROBE et al. (1993: 1234-1236) und FITZNER & KOWNATZKI (1995). Detaillierte Informationen zur Methodik geben UNESCO/RILEM (1978b), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 19-23), FITZNER (1988: 16-17) und METZ & KNÖFEL (1991). Allerdings ist für diese Untersuchungen ein besonderes Gerät erforderlich, das nur wenige Institutionen besitzen. Eine Messung der Porengrößen-Verteilung mittels der Saugkraft eines porösen Materials (siehe: UNESCO/RILEM 1978a) ist keine Alternative zur Quecksilber-Porosimetrie, da sie sehr zeit- und arbeitsaufwendig ist und prinzipielle Probleme mit der Porengeometrie (siehe unten) auch dort bestehen.

Zwei grundlegende Probleme gibt es bei der Anwendung der Quecksilber-Porosimetrie:

- Das Porosimeter kann nur messen, welche Menge Quecksilber bei welchem Druck in die poröse Probe eingepreßt wird. Um daraus Rückschlüsse auf den Porendurchmesser und seine Verteilung ziehen zu können, werden Modelle zur Porengeometrie benötigt. Wie komplex die Überlegungen beim Erstellen eines porengeometrischen Modelles für die - in dieser Hinsicht sehr gut untersuchten - Sandsteine sind, zeigen z. B. die Arbeiten von FITZNER & SNETHLAGE (1982, 1983).
- Eine Messung an diesem Gerät ist sehr teuer. Deshalb ist es nicht als Standardmethode zur Charakterisierung der Mauersteine geeignet.

Die Möglichkeit, wenige ausgewählte Proben quecksilberporosimetrisch untersuchen zu lassen, scheidet aus folgenden Gründen aus:

- Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der vorliegenden Kalksteine (siehe Kap. 4.5.) zeigt, daß ihre Geometrie des Porenraums nicht mit der von Sandsteinen verglichen werden kann. Während der Porenraum von Sandsteinen aus Zwickelhohlräumen mit im Idealfall $\pm$ isometrischer Gestalt besteht, wird in den untersuchten Kalksteinen im Idealfall der Porenraum $\pm$ ausschließlich aus mikroskopisch kleinen Rissen von sehr großer flächiger Ausdehnung, aber sehr geringer Breite aufgebaut. Deshalb ist das zur Auswertung von Messungen mit dem Quecksilber-Porosimeter verwandte Zylinderporen-Modell für Kalksteine noch weniger geeignet als für Sandsteine.
- Aus diesem Grund müßte für eine sinnvolle Interpretation der vom Quecksilber-Porosimeter gemessenen Werte erst ein geeignetes porengeometrisches Modell entwickelt werden. Dazu wären aber sehr umfangreiche Meßreihen am Quecksilber-Porosimeter und sehr ausführliche mathematisch-programmiertechnische Überlegungen notwendig, die im personellen und finanziellen Rahmen dieses Projektes nicht möglich sind.
- Normalerweise wird am Quecksilber-Porosimeter die Porosität einer Probe durch kontinuierliche Erhöhung des Quecksilber-Einpreßdruckes gemessen. Untersuchungen von ROBERTSON (1982, 1985), GAURI & CHOWDHURY et al. (1988), CHOWDHURY et al. (1990) und PUNURU et al. (1990) zeigen aber, daß es sinnvoll (oder sogar notwendig) sein kann, den Druck nach Füllung sämtlicher Poren wieder zu reduzieren und dann erneut zu erhöhen, um Hysteresis-Effekte durch in „ink-bottle“-Poren zurückgehaltenes Quecksilber zu messen, die unter Umständen verwitterungsrelevant sind. Das kompliziert allerdings die Messungen am Quecksilber-Porosimeter erheblich.

Aus diesen Gründen wird in diesem Forschungsprojekt die Quecksilber-Porosimetrie nicht angewandt.

2.10. Geochemische Untersuchungsmethoden

Es gibt eine große Fülle geochemischer Untersuchungsmethoden; und sie werden oft im Rahmen von Arbeiten zur Naturstein-Verwitterung angewandt. Dabei lassen sich drei Arbeitsfelder unterscheiden:

- Untersuchung der angewitterten Gesteinsoberfläche. Hier soll erforscht werden, welche Veränderungen an der verwitternden Gesteinsoberfläche erfolgen, welche Agenzien (z. B.: SO_2 , SO_3 , NO_x , H_2O) wirksam werden und wie der Prozeß der Oberflächenverwitterung abläuft. Zu diesem Fragenkomplex gibt es eine Fülle von Publikationen (siehe z. B.: HERRERO 1967; FASSINA, LAZZARINI & BISCONTIN 1976; NIESEL 1979; ZEZZA 1981; BLANC, JATON & ORIAL 1981: 348-350; ZEHNDER 1982; FASSINA & CHERIDO 1985; LIVINGSTON 1985; ZALLMANZIG 1986; MENTLER et al. 1986; GORETZKI, FÜTING & KÖHLER 1987; JAYNES & COOKE 1987; AIRES-BARROS & ALVES 1988; FASSINA 1988a, b, 1992; SHERWOOD & REDDY 1988; GORALCZYK et al. 1988; ROEKENS et al. 1988; THEOULAKIS & MOROPOULOU 1988; DUTTLINGER & KNÖFEL 1989; ROSS et al. 1989; LUKAS 1990: 161-175; CICHOVSKY 1990; ADAM 1992; BÖKE et al. 1992; SHERWOOD & DOLSKE 1992; MARAVELAKI et al. 1992). Da im vorliegenden Material die Oberflächenschäden nur eine sehr untergeordnete Rolle spielen (siehe Kap. 2.3. und 4.1.) und die Zielsetzung dieses Projektes primär nicht auf die Erfassung der Verwitterungsprozesse, sondern der die Verwitterungsbeständigkeit beeinflussenden Gesteinsparameter gerichtet ist, wird hier auf derartige Untersuchungen verzichtet.
- Untersuchung des $\pm$ unverwitterten Gesteins (im Kern des Mauersteins oder in Vergleichsproben) zur Erfassung der für die Verwitterung (bzw. Verwitterungsbeständigkeit) relevanten Parameter. Diese gelegentlich angewandte Vorgehensweise (siehe z. B.: HILBERT 1991; MIRWALD 1987b; ROSS et al. 1989: 373; HUDEC 1980: 499-500; JAMES 1981; HARVEY et al. 1978) beruht auf der Erwartung, daß die Verwitterungsbeständigkeit eines Gesteins (auch) von seiner chemisch-mineralogischen Zusammensetzung abhängt. Dieser Aspekt besitzt natürlich für das vorliegende Projekt große Bedeutung und wird dementsprechend berücksichtigt.
- Untersuchung des $\pm$ unverwitterten Gesteins (im Kern des Mauersteins), um Aussagen über die Herkunft, Bildung und Diagenese des Gesteins treffen zu können. Der Aspekt der Herkunft spielt meist eine untergeordnete Rolle, da sich diese Fragen normalerweise leichter mit Handstücken und Dünnschliffen klären lassen. Ausnahmen sind eine von BORTOLASO et al. (1988) beschriebene geochemische Untersuchung roter Knollenkalke und die von MELLO et al. (1982) an italienischen Marmoren zur Identifizierung der Herkunft durchgeführte Neutronen-Aktivierungs-Analyse. Geochemische Untersuchungen zur Bildung und Diagenese finden sich hauptsächlich in sedimentologisch-stratigraphischen Arbeiten. Trotzdem berücksichtigte ich auch diesen Aspekt bei der Wahl der Methoden.

Da am Institut ein Atomemissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Hochfrequenzplasma (ICP-AES) zur Verfügung steht, bietet es sich an, den salzsäurelöslichen Anteil damit zu analysieren. Das ICP-AES bietet gegenüber anderen Analysemethoden den Vorteil, bei einfacher Bedienung zahlreiche Elemente schnell und genau messen zu können. Die Analyse des salzsäurelöslichen Anteils wird einer Gesamtanalyse vorgezogen, da zum einen die Ergebnisse einer undifferenzierten Gesamtanalyse nur schwer zu interpretieren sind und da zum anderen der dazu notwendige Aufschluß des Gesteins erheblich schwieriger wäre. Da diese Analysen zusammen mit den Dünnschliff-Untersuchungen für sämtliche Proben ein klares Bild der Karbonat-Mineralogie ergeben, ist es für das bisher vorliegende Material nicht notwendig, die Karbonate zusätzlich röntgendiffraktometrisch zu untersuchen.

Über die Analyse des salzsäurelöslichen Teils der Kalksteine hinaus ist es wichtig, zumindest den Umfang des salzsäureunlöslichen Anteils (Quarz, Feldspat, Tonminerale) zu erfassen, da er möglicherweise die Verwitterungsbeständigkeit negativ beeinflusst (siehe z. B.: DE QUERVAIN 1945: 42; DELGADO RODRIGUES 1976; HUDEC 1980; CANER & SEELEY 1978; LEWIN & CHAROLA 1981; ESBERT et al. 1981; ESBERT, ORDAZ & SUÁREZ DEL RIO 1983: 248; FASSINA & CHERIDO 1985; NIJS 1985; ORDAZ & ESBERT 1985; DUTTLINGER & KNÖFEL 1989: 102; ČICHOVSKY 1990; NIJS & DE GEYTER 1991: 671; HILBERT 1991: 141; KETTELHACK 1992: 92). Der salzsäureunlösliche Anteil kann auch Hinweise zur Fazies und Stratigraphie geben (siehe z. B.: FLÜGEL 1982: 416-417; BACKHAUS & FLÜGEL 1971; BAUSCH & POLL 1976, 1984). Da der Gehalt an salzsäureunlöslichen Bestandteilen $\pm$ gering ist, mit dem Röntgen-Diffraktometer nur eine halbquantitative Analyse möglich ist (siehe z. B.: BAUSCH & POLL 1976: 583-584) und eine zufriedenstellende Charakterisierung der Tonminerale röntgendiffraktometrisch sehr aufwendig ist, wird auf eine weitere Analyse des salzsäureunlöslichen Anteils verzichtet.

Im einzelnen wird bei den geochemischen Untersuchungen wie folgt vorgegangen: Aus dem Kernbereich des Mauersteins werden ca. 150-250 g Gestein entnommen, die in einem Backenbrecher gebrochen werden. Davon wird ein Teil in einer Scheibenschwingmühle analysenfein gemahlen.

Für die Untersuchung am ICP-AES wird je Probe ca. 0,1 g analysenfein gemahlenes Pulver auf 0,0001 g genau abgewogen und mit einem großen Überschuß an konzentrierter Salzsäure (suprapur) bei Raumtemperatur aufgelöst. Diese Lösung wird mit Aquadest auf 100 ml aufgefüllt und dann filtriert, um den bei der Analyse störenden säureunlöslichen Rückstand zu entfernen. Um die Genauigkeit der Analyse überblicken zu können, werden in regelmäßigen Abständen von einer Probe zwei Aufschlüsse erstellt und analysiert. Die Kalibration des ICP-AES erfolgt mit einem Blank (eine Lösung aus 100 ml Aquadest mit 7 ml konzentrierter Salzsäure) und einer Standardlösung, in der die Elemente eine ähnliche Konzentration wie in den Proben haben. Die Arbeitsweise und der Anwendungsbereich des ICP-AES werden von SCHRADER (1984) und KUDERMANN & BLAUFUSS (1984) ausführlich dargestellt. Da das ICP-AES bei einer Analyse eine Reihe verschiedener Elemente erfassen kann, ermittelt es bei diesen Proben die Häufigkeit der Hauptelemente Ca, Mg und Fe sowie der Spurenelemente K, Na, Sr, Ba, Al und Mn (in mg/kg Gestein). Die Liste der Spurenelemente beruht auf einem Kompromiß zwischen den in der Literatur als für Kalksteine besonders wichtig erachteten Elementen (siehe: FLÜGEL 1982: 418-425; WEDEPOHL 1970; WOLF, CHILINGAR & BEALES 1967; VEIZER 1983; RÖHL 1988, 1990b; MEDUNA & BAUSCH 1985; KRANZ 1976; BRAND & VEIZER 1980) und den Nachweisgrenzen des ICP-AES. Erwähnenswert ist noch, daß die gemessenen Werte für Kalzium in Einzelfällen etwas zu niedrig sein können, da die Kalzium-Gehalte der Lösungen sehr hoch sind.

Zur Messung des salzsäureunlöslichen Rückstands wird bei jeder Probe ca. 2,5-4 g analysenfein gemahlenes Pulver auf 0,0001 g genau gewogen und mit einem großen Überschuß an konzentrierter Salzsäure (technisch) aufgelöst. Dann werden Lösung samt Rückstand filtriert. Zur Beschleunigung des Verfahrens erfolgt die Filtration in eine Saugflasche hinein, in der eine Wasserstrahlpumpe ein Vakuum erzeugt. Das Filterpapier ist vorher bei 60 °C im Trockenschrank getrocknet und auf 0,0001 g genau gewogen worden. Nach dem Abschluß der Filtration wird das Filterpapier erneut bei 60°C getrocknet und gewogen. Die Gewichtszunahme repräsentiert den unlöslichen Rückstand. Um die Genauigkeit des Verfahrens prüfen zu können, werden in regelmäßigen Abständen von einer Probe zwei Aufschlüsse erstellt und analysiert. Die Differenz zwischen zwei Messungen einer Probe beträgt bei einem Gehalt an unlöslichem Rückstand von weniger als 10 % nur 0,01-0,2 % (absolut) und von mehr als 10 % nur 0,2-0,7 % (absolut).

2.11. Verwitterungssimulations-Versuche

Im Rahmen von Untersuchungen, die sich mit dem Verwitterungsprozeß und/oder der Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinen und anderen steinartigen Baustoffen beschäftigen, werden häufig Verwitterungssimulations-Versuche durchgeführt. In nicht wenigen Fällen sind die Ergebnisse dieser Versuche einziger Maßstab für die Verwitterungsbeständigkeit des Gesteins (bzw. Baustoffs), wie z. B. bei FITZ-

NER (1970; 1988: 201), HARVEY et al. (1974, 1978), ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977), HUDEC (1980), LEARY (1981), FITZNER & SNETHLAGE (1982), ESBERT & ORDAZ (1985), ORDAZ & ESBERT (1985) und VALDEÓN et al. (1992).

Trotz der allgemeinen Üblichkeit von Verwitterungssimulations-Versuchen ist ihre Anwendung mit einigen Problemen verknüpft:

- Das Ziel von Verwitterungssimulations-Versuchen ist, die Wirkung einer Jahre bis Jahrzehnte langen natürlichen Verwitterung innerhalb einen überschaubaren Zeitraums zu erreichen; d. h. infolge der angestrebten Zeitraffung kann der (zumindest potentiell) verwitterungsrelevante Faktor Zeit überhaupt nicht adäquat erfaßt werden. Weder die zeitliche Länge eines Prozesses oder Zustands, noch seine natürliche Wiederholungsfrequenz, können - soweit sie überhaupt genügend bekannt sind - wiedergegeben werden. So ist z. B. GRIMM (1983: 45) der Ansicht, daß bei vielen Laborversuchen die Zahl der Wiederholungen wahrscheinlich nicht genügt, „um den jahrelangen periodischen Gang in der Natur zu simulieren.“ Ähnliche Bedenken äußert GRIMM (1986a: 434).
- Der Verwitterungsprozeß ist sehr komplex und die verwitterungsrelevanten Faktoren sehr vielfältig. Innerhalb eines Verwitterungssimulations-Versuches lassen sich aber nur einige wenige Faktoren und Prozesse berücksichtigen. Da aber keine allgemeine Übereinstimmung darüber besteht, welche Faktoren und Prozesse am wichtigsten sind, gibt es zahlreiche, z. T. sehr unterschiedliche Verwitterungssimulations-Versuche; und es ist der persönlichen Ansicht des jeweiligen Bearbeiters überlassen, zu entscheiden, welcher Versuch am besten die natürliche Verwitterung simuliert (siehe auch weiter unten im Text).
- In einigen Fällen ist es nicht völlig bekannt, wie der entsprechende Verwitterungssimulations-Versuch wirkt, oder er hat unerwartete Nebenwirkungen (siehe z. B.: AUBERTIN & LAROCHELLE 1984; OZOL 1984; HUDEC 1978a; BINDA et al. 1985).
- Verwitterungssimulations-Versuche sind ziemlich zeitaufwendig (mehrere Tage bis Wochen Dauer) und der Aufbau erlaubt meist nur wenige Proben gleichzeitig zu behandeln.

Diese Gründe sprechen gegen eine Anwendung von Verwitterungssimulations-Versuchen. Da es das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes ist, Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen verschiedenen Kalkstein-Varietäten zu erkennen durch die Untersuchung von Material, das Jahrzehnte bis Jahrhunderte lang der natürlichen Verwitterung ausgesetzt war, besteht hier glücklicherweise keine Notwendigkeit, Verwitterungssimulations-Versuche anzuwenden. Bestenfalls kann es sinnvoll sein, durch derartige Versuche an Kalksteinen, von denen keine unter natürlichen Bedingungen verwitterten Probenkollektive vorliegen, die Übertragbarkeit der in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Ergebnisse zu prüfen. Bevor in Einzelfällen an Proben aus Kalksteinen, von denen keine Probenkollektive vorliegen, ein Verwitterungssimulations-Versuch durchgeführt werden kann, muß man sich darüber klar werden, welchen Versuch man anwenden möchte:

Bis auf sehr wenige Ausnahmen (siehe: AIRES-BARROS 1977; SCALI & STOCKBRIDGE 1982; BLASCHKE 1986: 336-346, AIRES-BARROS, MAURÍCIO & FIGUEIREDO 1991) lassen sich die Verwitterungssimulations-Versuche in zwei Gruppen aufteilen:

- 1) Versuche, die davon ausgehen, daß der hauptsächliche Schädigungsprozeß in der Gesteinsverwitterung die Frostsprengung ist. Dabei lassen sich zwei Typen gegeneinander abgrenzen, die häufig verwandt werden:
 - a) Frost-Tau-Wechselversuche: Wie der Name schon sagt, wird in diesen Versuchen eine wasserhaltige Gesteinsprobe in bestimmten Zeitintervallen auf unter 0 °C gekühlt bzw. auf über 0 °C erwärmt. Je nach Verfahren können Wassersättigung und Zeitintervalle variieren, außerdem kann die Temperaturänderung ungerichtet (allseitig) oder gerichtet (einseitig) erfolgen. Frost-Tau-Wechselversuche werden z. B. von DE QUERVAIN (1967: 185), FITZNER (1970: 134-172), WEST (1970: 108-109), WINKLER (1973: 178-180), CRNKOVIC & KRTOLICA (1976: 189-191), PESCHEL (1977: 115-116), ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977), TABASSO (1978), HUDEC (1978b, 1980), FRANK (1981, 1983), SCALI & STOCKBRIDGE (1982), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 35-38), DIN 52104 (11/1982), AMOROSO & FASSINA (1983: 26-28), CANER & TÜRKMEENOGLU (1985), ESBERT & ORDAZ (1985: 326-328), WIHR (1986: 74), MIRWALD (1987b), BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988a, b), FITZNER (1988: 22-23, 96-105, 118-160), MEISEL (1988: 163-164), VAN GEMERT, ULRICH & VIAENE (1988), VAN GEMERT & VAN BALEN (1988), NAKAMURA (1988a, b), LANGER (1989: 65-68), DÜPPENBECKER & FITZNER (1991: 42), FITZNER & KALDE (1991), FITZNER & KOWNATZKI (1991b: 114-118), PROUT & HOFF (1991), RENSCH (1991: 278), ROSS, HART & BUTLIN (1991: 106-107), STORCH & TUR (1991: 191-193), VALDEÓN et al. (1992), WEISS (1992: 48-82), FRANKE & BENTRUP (1993a, b) und FRANKE et al. (1993b: 46) angewandt bzw. beschrieben. Der Artikel von BENDER & HÄNDLE (1991) liefert eine ausführliche Literaturzusammenstellung zur Anwendung von Frost-Tau-Wechselversuchen auf Ziegelsteine.

- b) Salzkristallisationsversuche: Dieser Typ von Versuchen basiert auf der Idee, daß der Druck, den Kristalle bei ihrem Wachstum im Porenraum auf die Porenwände ausüben, dem Druck prinzipiell vergleichbar ist, den Eis infolge seiner Volumenvergrößerung beim Gefrieren ausübt. Normalerweise wird Natriumsulfat verwandt – nur selten Magnesiumsulfat (siehe z. B.: DE QUERVAIN 1967: 189; FITZNER 1970: 202-203, HUDEC 1978b; AUBERTIN & LAROCHELLE 1984; BINDA et al. 1985) –, das besonders schädigend wirkt, da es abhängig von der Temperatur in zwei verschiedenen Hydratationsstufen (Thenardit $[\text{Na}_2\text{SO}_4]$ und Mirabilit $[\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}]$) vorliegen kann. Desweiteren wird je nach Verfahren mit unterschiedlichen Lösungskonzentrationen, Zeitintervallen und Trocknungsmethoden gearbeitet. Beschreibungen und/oder Anwendungsbeispiele finden sich z. B. bei SCHAFFER (1932: 69), HONEYBORNE & HARRIS (1958), DE QUERVAIN (1967: 188-190), FITZNER (1970: 187-203), HARVEY et al. (1974: 1-3; 1978: 7-9), CRNKOVIC & KRTOLICA (1976: 187-188), PESCHEL (1977: 116), HUDEC (1978b), ROSSI-MANARESI & GHEZZO (1978), TABASSO (1978), ACCARDO et al. (1981), LEARY (1981), CASSARO et al. (1982), NIESEL (1982: 83-86; 1986b: 62-63), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 38-42), ROBERTSON (1982), FITZNER & SNETHLAGE (1982, 1983), AUBERTIN & LAROCHELLE (1984), OZOL (1984), BINDA et al. (1985), CANER & TÜRKMEENOGLU (1985), ESBERT & ORDAZ (1985: 328-330), KRAUS (1985: 35, 175-178), ORDAZ & ESBERT (1985: 97-99), WIHR (1986: 75-78), MIRWALD & ZALLMANZIG et al. (1987: 290-291), FITZNER (1988: 24-26, 106-195), MEISEL (1988: 161-162), DERMENTZOPOULOS et al. (1988: 623-624), ATTEWELL & TAYLOR (1988: 746-747), GUERRERO et al. (1988), JABLOŇSKA-SZYSZKO & RUDNICKA (1988), VAN GEMERT, ULRICH & VIAENE (1988), THEOULAKIS & MOROPOULOU (1988: 90-92), DIN 52111 (3/1990), CHRISTARAS (1991), FITZNER & KALDE (1991), FITZNER & KOWNATZKI (1991b: 114-118), RENSCH (1991: 278), ROSS, HART & BUTLIN (1991: 100-101, 107), STORCH & TUR (1991: 191), ALESSANDRINI & BOCCI et al. (1992), McMAHON et al. (1992) und WEISS (1992: 82-106).
- 2) Versuche, die davon ausgehen, daß der hauptsächliche Schädigungsfaktor in der Gesteinsverwitterung saure Lösungen bildende Gase (insbesondere SO_2) sind. Beispiele für derartige Versuche geben z. B.: SCHAFFER (1932: 29, 36, Abb. 21-22), ROSSI-MANARESI & GHEZZO (1978), WOLFF (1978: 502), NIESEL (1979: 108-112), FRANK (1981), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 42-46), FITZNER & SNETHLAGE (1982), KRAUS (1985: 34-35, 175-180), WEBER (1985: 527-531), WIHR (1986: 74-75), ATTEWELL & TAYLOR (1988: 747), MEISEL (1988: 162), VAN GEMERT, ULRICH & VIAENE (1988), BRÜGGERHOFF (1991), SCHWARZ et al. (1991a, b) und LEWRY, BIGLAND & BUTLIN (1992).

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß in Mitteleuropa Kalksteine hauptsächlich durch Frostsprengung Verwitterungsschäden erleiden (siehe Kap. 7.2.). Deshalb kommt für etwaige Verwitterungssimulations-Versuche nur ein Verfahren der Gruppe 1 infrage. Da mit dem Kristallisationsversuch nach dem Verfahren A der DIN 52111 (3/1990) ein genormtes, oft erprobtes, allgemein als sehr aussagekräftig geltendes und relativ einfaches Verfahren vorliegt, bietet sich dieses besonders zur Anwendung an. Aus den oben dargelegten Gründen wird es aber nicht zur Untersuchung der Probenkollektive verwandt.

2.12. Statistische Auswertung und Präsentation

Die im Rahmen der oben beschriebenen Untersuchungen anfallenden Daten lassen sich nur mit EDV sinnvoll verwalten und verarbeiten. Zur Erfassung der Daten und zur Durchführung der notwendigen Berechnungen wird das relationale Datenbank-Programm PHOENIX verwandt. Die statistische Auswertung der Daten und ihre Darstellung in Diagrammen erfolgt mit dem Programm TechPlot. Aus Gründen der Anschaulichkeit erfolgt die Darstellung der Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern in Liniendiagrammen. Um die Trends in den Diagrammen darzustellen, wird als Ausgleichspolynom in sämtliche Diagramme ohne Mikrofaziestypen die lineare Regression (= Fit-Gerade) eingetragen. In Diagrammen, in denen eine der Achsen mit Mikrofaziestypen belegt ist, ergibt die Eintragung eines Ausgleichspolynoms keinen Sinn, da Mikrofaziestypen kein quantitatives, sondern ein qualitatives Merkmal sind. TechPlot berechnet die lineare Regression so, daß die Summe der quadratischen Abweichungen der Regressionsgeraden von den Daten ein Minimum wird. Der linearen Regression wird gegenüber quadratischen und noch komplexeren Fit-Funktionen der Vorzug gegeben, weil sie die einfachste mögliche Korrelation darstellt. Andere statistische Operationen werden in dieser Arbeit normalerweise nicht angewandt, da die verhältnismäßig geringen Datenmengen zusammen mit der relativ großen Streuung keine brauchbaren Ergebnisse erwarten lassen. Nur für die geochemischen Daten werden Clusteranalysen mit dem Programm ST-Statistik erstellt. Einzelne graphische Darstellungen von Meßwerten als dreidimensionale Punktwolken erfolgen mit dem Programm Xact. Für alle statistischen Auswertungen und graphischen Darstellungen gilt, daß sie nicht „geschönt“ wurden, obwohl es oft durchgeführt und gelegentlich sogar ausdrücklich empfohlen wird (siehe z. B. REINSCH 1991: 266).

3. Untersuchte Natursteine und Probenkollektive

Die im Kapitel 2.2. aufgeführten notwendigen Anforderungen an einen Standort zur Entnahme eines Probenkollektivs schränkt die Anzahl potentiell geeigneter Untersuchungsobjekte sehr ein; desweiteren müssen die zuständigen Institutionen kooperationsbereit sein. Trotzdem konnte unter anderem Material aus dem Trochitenkalk (Trochitenkalk-Formation des Oberen Muschelkalks) von Bielefeld und dem Osnabrücker Wellenkalk (Wellenkalk-Formation des Unteren Muschelkalks) von Osnabrück untersucht werden. Es ist sehr interessant, beide Gesteine miteinander zu vergleichen, da beide nicht nur als Baustein regionale Bedeutung besaßen, sondern auch unter paläogeographisch ähnlichen Bedingungen entstanden und eine vergleichbare erdgeschichtliche Entwicklung (Umfang und Zeitlichkeit der tektonischen Beanspruchungen, Versenkungstiefe usw.) erfuhren (siehe dazu u. a. Tabelle 1). Als Ergänzung dazu wurde auch Material aus dem Oberen Muschelkalk von Oerlinghausen berücksichtigt. Eine ganz andere Geschichte hat der Beisinghäuser Kalkstein aus dem Devon von Eslohe (Sauerland). Gerade deshalb liefert er wichtige Aufschlüsse über Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Verwitterung bei verschiedenen Kalksteinen. Aus diesem Grund wurde an der Kirche St. Pankratius in Eslohe-Reiste, die aus Beisinghäuser Kalkstein erbaut wurde, im Oktober 1992 das Probenkollektiv P entnommen.

Kalksteine des Muschelkalks - insbesondere des Oberen Muschelkalks - besaßen und besitzen in Deutschland wohl die größte Bedeutung und Verbreitung unter den als Baustein verwandten Kalksteinen. Da aber Fazies, physikalische Parameter und genaue stratigraphische Einstufung sehr unterschiedlich sein können, muß eine einfache Gleichsetzung dieser verschiedenen Naturbausteine vermieden werden. Deshalb war am Anfang des Forschungsprojektes beabsichtigt, sich auf die Kalksteine des Muschelkalks im Raum Osnabrück-Bielefeld zu beschränken. Diese Einschränkung wurde aus folgenden Gründen aufgegeben:

- 1) Die Untersuchung des Materials und das Literaturstudium zeigen, daß es sinnvoll ist, auch andere, ± ähnliche Kalksteine zu untersuchen, um so besser herausarbeiten zu können, was allgemeinverbindlich ist und was nur für Einzelfälle gilt.
- 2) Mit der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme (siehe Kap. 5.) liegt ein Kriterium vor, das anscheinend ± allgemeingültig für Kalksteine ist. Es sollte deshalb ebenso wie die im Kap. 5. entwickelten Auswahlmethoden für verwitterungsbeständige Kalksteine an weiteren unterschiedlichen Kalkstein-Typen erprobt werden.
- 3) Aufgrund der im Kapitel 2.2. dargelegten notwendigen Anforderungen an den Standort für die Entnahme eines Probenkollektivs ist es sehr schwer, genügend geeignete und umfangreiche Probenkollektive aus diesem Raum zu gewinnen.

Verschiedene Systeme zur Anordnung der Probenkollektiv-Beschreibungen in diesem Kapitel sind denkbar. Die hier gewählte Anordnung folgt der chronologischen Reihenfolge der Bearbeitung der Probenkollektive. Diese bietet sich an, da die Ergebnisse früherer Probenkollektiv-Bearbeitungen die Auswahl der Untersuchungsmethoden für die nachfolgenden Probenkollektive beeinflussen (vgl. z. B. Tabelle 1). Die geographische Lage sämtlicher Probenkollektive läßt sich Abb. 3 entnehmen.

3.1. Trochitenkalk von Bielefeld

In Norddeutschland wurde der Trochitenkalk [= unterer Teil der Trochitenkalk-Formation des Oberen Muschelkalks in der Gliederung von HAGDORN, HORN & SIMON (1993: 44)] an vielen Stellen als Baustein gebrochen und verwandt. Neben den Vorkommen in Niedersachsen (siehe STEIN 1981: 7; 1983: 114) ist besonders der ostwestfälische Raum zu erwähnen. In der Umgebung von Bielefeld war der Trochitenkalk ein gern verwandter Baustein, der im Bereich der Stadt vermutlich schon im Mittelalter gebrochen wurde. „Die ältesten Steinbrüche bei Bielefeld haben wohl an der Nordseite der ‚Promenade‘ gelegen, sind aber zum Teil wieder zugeschüttet und bepflanzt“ (MESTWERDT & BURRE 1981: 28). Deshalb ist anzunehmen, daß auch die Mauersteine der nahegelegenen Burg Sparrenberg (siehe unten) daher stammen. Bei einer Übersichtsbegehung beobachtete ich, daß noch heute in mehreren kleinen Aufschlüssen 0,4-1,7 km süd-östlich der Burg Sparrenberg am Nordosthang der „Promenade“ Trochitenkalk aufgeschlossen ist, in dem dieselben Faziestypen wie in den entnommenen Proben des Probenkollektivs S auftreten. Das ist ein weiterer Hinweis darauf, daß die Mauersteine der Burg Sparrenberg dort gebrochen wurden. Es ist sehr fraglich, ob eine Detailaufnahme dieser Aufschlüsse sinnvoll ist, da sie so klein und verfallen sind, daß sie weder einen Überblick über die stratigraphische Abfolge erlauben, noch für die Entnahme von Ersatzsteinen in Frage kommen. Außerdem würde eine systematische Aufschlußaufnahme stellenweise durch die Ausweisung als Naturdenkmal erschwert. Sie hätte ohnehin erst dann größeren Nutzen, wenn sich große Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit der Mikrofaziestypen erkennen ließen. Es liegen Dünnschliffe aus dem Trochitenkalk von Helpup südöstlich Bielefeld (siehe 3.4.2.) als Vergleichsmaterial vor.

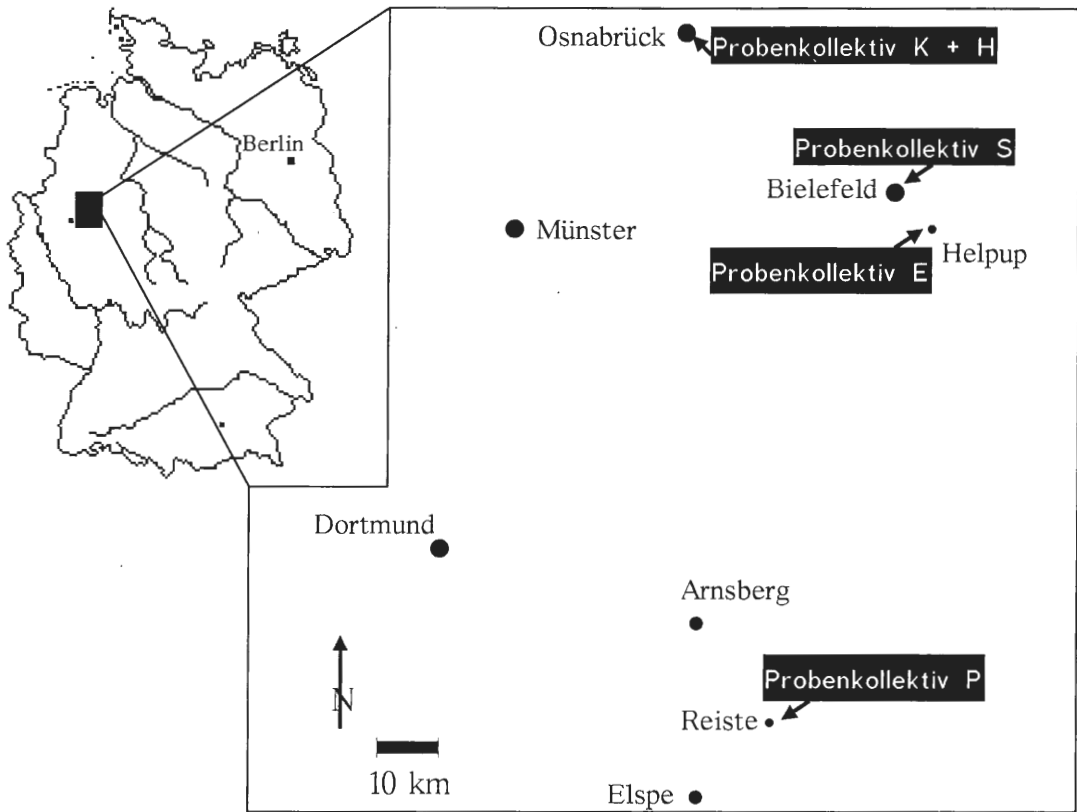


Abb. 3: Geographische Lage der untersuchten Probenkollektive.

3.1.1. Probenkollektiv S: Burg Sparrenberg

Die Burg Sparrenberg (MTB 3917 Bielefeld, R³⁴ 67600 H⁵⁷ 64675) liegt südwestlich des Stadtkerns von Bielefeld auf einem Höhenrücken, der von Gesteinen des Muschelkalks gebildet wird. Ihr Gründungsdatum läßt sich auf die Zeit zwischen 1226 und 1256 eingrenzen (WILBRAND 1932: 3). Danach erfuhren mehrfach Teile der Burg Umbauten, Beschädigungen und Wiederaufbauten, die WILBRAND (1932) chronologisch auflistete. Unter diesen interessieren hier nur jene, die (möglicherweise) die südwestliche Bastionsmauer oberhalb der dortigen Kasematten betrafen: 1631 wurde ein Teil der Festungswerke geschleift, aber schon 1639 wurden die Festungswerke auf dem Sparrenberg wiederhergestellt, und 1648-1649 erfolgten bedeutende Ausbesserungen und Neubauten auf dem Sparrenberg. Zum Bau der Bielefelder Kaserne wurden der Burg Sparrenberg im Jahre 1775 Steine entnommen, wodurch sie teilweise zur Ruine wurde. Seit 1841 erfolgte dann - dem erwachenden Geschichtsinteresse entsprechend - stückweise die Wiederherstellung (bzw. Wiederaufbau) der Burg (Details siehe WILBRAND 1932: 13-17). In den letzten Jahren wurde eine Renovierung (bzw. Wiederaufbau) der Bastionsmauer durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeiten konnte im Sommer 1991 das Probenkollektiv S entnommen werden.

Das Probenkollektiv S entstammt dem obersten Teil der Bastionsmauer im Südwest-Teil der Burg; denn es wurde mir vor der Probennahme von Herrn Lange (beim Hochbauamt der Stadt Bielefeld zuständig für die Burg Sparrenberg) bestätigt, daß der oberste Teil der Bastionsmauer dort noch in seinem historischen Zustand sei. Die Probennahme erfolgte am südöstlichen Ende der Südwest-Seite. Dort ist oberhalb eines renovierten Absatzes (auf der Innenseite der Bastionsmauer), der das Dach der oberirdischen Kasematten bildet, noch eine 50-80 cm hohe Brüstungsmauer erhalten. Diese Brüstungsmauer reicht vom Nordende des „Schusterrondells“ ca. 20 m nach Nordwesten. Auf ihrer nach Südwesten exponierten Außenseite waren Steine für den Bau der Kaserne entnommen worden. Demgegenüber war auf der nach Nordosten exponierten Innenseite der Brüstungsmauer zum Zeitpunkt der Probennahme noch die ursprüngliche Oberfläche

erhalten. Da es auf der Innenseite keine Hinweise auf eine nachträgliche Veränderung dieses Mauerabschnittes (wie z. B. auffällige Unterschiede bei den Mauersteinen, verschiedene Mörtel) gab, kann man davon ausgehen, daß die Innenseite der Brüstungsmauer seit ihrer Errichtung $\pm$ unverändert der Witterung ausgesetzt war. Damit bot die Innenseite dieser Brüstungsmauer die notwendigen Voraussetzungen für die Entnahme eines Probenkollektivs. Aus meinen Unterlagen geht nicht klar hervor, wie lange dieser Mauerabschnitt schon in dieser Form existiert; unter Berücksichtigung der Geschichte der Burg darf man davon ausgehen, daß der beprobte Mauerteil nicht später als 1649 entstand (Expositionsdauer ca. 342 Jahre). Die Brüstungsmauer war zur Zeit der Probennahme sehr verfallen: Die Mauersteine ließen sich leicht aus der Mauer herauslösen, da durch die Verwitterung der Fugenmörtel geschädigt war. Auf der Brüstungsmauer lag Erde und es wuchsen Büsche darauf.

Das Probenkollektiv S besteht aus 17 Mauersteinen (S1-S17), die auf der nach Nordosten exponierten Seite der oben beschriebenen Brüstungsmauer entnommen wurden. Die Mauersteine haben z. T. ziemlich unregelmäßige Gestalt. Ihre Länge beträgt 13-28 cm, ihre Höhe 8-18 cm und ihre Tiefe 13-36 cm (arithmetische Mittel siehe Tabelle 1). Ihr Bearbeitungszustand ist in allen Fällen bruchrau; sie zeigen keine Spuren einer weiteren Steinmetz-Bearbeitung (siehe Taf. 2 Fig. 4-6). Da im Gestein die Schichtung nicht sehr gut erkennbar ist, ließ sich in Einzelfällen nicht sicher feststellen, ob der Mauerstein lagerhaft oder auf Spalt eingebaut war. Alle entnommenen Mauersteine bestehen aus Trochitenkalk und in der gesamten Mauer befanden sich keine andersartigen Bausteine. Dank des Entgegenkommens der Stadt Bielefeld repräsentieren die entnommenen Bausteine einen Querschnitt durch alle beobachteten Erhaltungszustände. Es handelt sich um hellgraue Kalksteine. An der Oberfläche sind die Komponenten mehr oder weniger herausgewittert. Schwarze Krusten auf der Oberfläche der Außenseite wurden nicht beobachtet. Vereinzelt (S11) treten mehrere mm dicke helle Sinterkrusten auf. In einem Teil der Mauersteine sind die Risse senkrecht zur Schichtung häufiger und besser entwickelt als die Risse parallel zur Schichtung, in einem anderen Teil ist es umgekehrt.

3.2. Wellenkalk von Osnabrück

Eine besondere Ausbildung der Wellenkalk-Formation (Unterer Muschelkalk) - der Osnabrücker Wellenkalk - wurde seit dem Mittelalter in zwei einander benachbarten Steinbrüchen am Westerberg in Osnabrück gebrochen. Da die Steine nur roh behauen werden konnten, finden sich keine Figuren, Reliefs oder Ornamente aus diesem Material. Die gut entwickelte Schichtung erleichterte aber die Gewinnung von handlichen Steinen mit ebener Ober- und Unterseite erheblich. Deshalb wurden sie als Mauersteine sehr geschätzt, so daß man vielerorts in der Stadt Osnabrück - insbesondere in der Altstadt - Mauern und Bauwerke beobachten kann, die aus diesem gelblich bis hellgrau verwitternden Gestein erbaut wurden (Beispiele siehe: IMEYER 1953: 26; MICHEL in DEUTLOFF et al. 1986: 62; GRIMM 1990: Gesteins-Taf. 166).

Dank der entgegenkommenden, verständnisvollen Hilfe zahlreicher Personen und Institutionen in Osnabrück ließ sich bis jetzt nicht nur das umfangreiche Probenkollektiv K und das kleine Probenkollektiv H zusammentragen, sondern auch der wichtigste Aufschluß im Osnabrücker Wellenkalk - der Steinbruch im Botanischen Garten - beproben.

3.2.1. Probenkollektiv K: Schwesternhaus der ehemaligen Städtischen Kliniken

Im Herbst 1991 wurden in Osnabrück für den Bau des „Centrums am Natruper Tor Wall“ große Teile der ehemaligen Städtischen Kliniken Osnabrück abgerissen, unter anderem auch das Schwesternhaus (MTB 3714 Osnabrück, R³⁴ 4400 H⁵⁷ 94350). Das Schwesternhaus bestand zum größten Teil aus steinsichtigem Osnabrücker Wellenkalk und wurde ca. 1880 erbaut (Expositionsdauer ca. 111 Jahre) [freundliche mündliche Mitteilung von Herrn Switala, Städtische Denkmalpflege, vom 29.7.1992]. Dieser Abriß bot ideale Voraussetzungen für die Entnahme eines umfangreichen Probenkollektivs. Als Standort für die Entnahme des Probenkollektivs wurde ein Mauerabschnitt auf der West-Seite des Schwesternhauses ca. 18 m südlich der Nordwest-Ecke ausgewählt. Er lag zwischen zwei Fenstern und deutlich oberhalb des Sockels. Da sämtliche Proben - 41 Mauersteine (K1-41) - aus einem Bereich 1,6-2,8 m über dem Erdboden entnommen wurden, bestand keine Gefahr einer Beeinflussung durch Grundfeuchte. Abgesehen von der Umrahmung der Fenster durch eine Ziegel-Reihe war zwischen den Fenstern auf der Außenseite nur Osnabrücker Wellenkalk und kein anderer Stein vermauert. Alle Mauersteine waren lagerhaft verbaut; nur sehr wenige sehr kleine Steine, die als Zwickelfüllung dienten, waren auf Spalt gesetzt. Die Größe der auf der Außenseite der Mauer

verwandten Steine war sehr variabel; ihre Länge betrug 11-42 cm, ihre Höhe 4-19 cm und ihre Tiefe 10-30 cm (arithmetische Mittel siehe Tabelle 1). Innerhalb der Mauer wurden meist kleinere Steine als außen verwandt; untergeordnet fanden sich im Inneren der Mauer auch zerbrochene Ziegel-Teile. Die Steine ließen sich ziemlich leicht abtragen, da der Mörtel sehr sandreich und mürbe war. Da es auf der Außenseite keine Hinweise auf eine nachträgliche Veränderung dieser Mauer oder die Wiederverwendung älterer Steine (wie z. B. auffällige Unterschiede bei den Mauersteinen, verschiedene Mörtel) gab, sondern die Mauer sehr einheitlich aussah, erfüllte sie alle im Kapitel 2.2. geforderten Kriterien.

Von der nach Westen exponierten Außenseite des oben beschriebenen Mauerabschnittes wurden 41 Mauersteine (K1-41) als Probenkollektiv K entnommen. Ihr Bearbeitungszustand ist in allen Fällen bruchrauh; sie zeigen keine Spuren einer weiteren steinmetzmäßigen Bearbeitung (siehe Taf. 2 Fig. 1-3). Ober- und Unterseite jedes Mauersteins werden durch Schichtflächen gebildet, ansonsten sind die Mauersteine $\pm$ unregelmäßig geformt. Es sind hellgraue Kalksteine, die gelblich (bzw. gelb-bräunlich) bis hellgrau anwittern. Die sedimentäre Schichtung ist gut bis sehr gut entwickelt, und die parallel zur Schichtung verlaufenden Risse sind im allgemeinen häufiger und/oder besser ausgebildet als die senkrecht dazu verlaufenden. Das Gestein zeigt häufig eine Neigung zu lagiger-plattiger Absonderung. Die Außenseite der Steine zeigt in wechselndem Umfang schwarze Krusten. Die schwarzen Krusten sind am stärksten in Einbuchtungen und an anderen $\pm$ regengeschützten Stellen der Oberfläche entwickelt.

3.2.2. Probenkollektiv H: Heger Tor

Ein kleines Probenkollektiv aus 7 Mauersteinen (H1-7) wurde dem 1816 errichteten Heger Tor im Stadtkern von Osnabrück entnommen. Während das eigentliche Tor aus Osningsandstein besteht (IMEYER 1953: 25, 122), wurde die von Norden auf dieses Tor hinaufführende Rampe aus Osnabrücker Wellenkalk erbaut. Die Proben wurden der nach Osten exponierten Seite der westlichen Brüstungsmauer dieser Rampe entnommen. Die Probennahme erfolgte im Rahmen von geringfügigen Renovierungsarbeiten am Heger Tor im März 1992. Deshalb konnten nur wenige Mauersteine entnommen werden, die nicht unbedingt für das verbaute Material repräsentativ sind; denn es wurden nur besonders stark geschädigte und/oder lose Mauersteine zur Verfügung gestellt.

Da die Probenmenge zu einer statistischen Auswertung zu gering war, die Mauersteine verhältnismäßig klein waren und diese Proben weder für die Zusammensetzung des Osnabrücker Wellenkalks noch für das Baumaterial des Heger Tors repräsentativ waren, wurde auf eine statistische Bearbeitung des Materials verzichtet. Trotzdem läßt sich sagen, daß diese Proben die anhand des Probenkollektivs K gemachten Beobachtungen über die geringe Verwitterungsbeständigkeit des Mikrofaziestyps 8 bestätigen (vgl. Kap. 4.2.2.). Besonders interessant ist, daß sich im Probenkollektiv H ein Mauerstein des Mikrofaziestyps 10 (Gelbkalke) findet - die Probe H1 -, da diese Gelbkalke im Probenkollektiv K völlig fehlen und auch ansonsten nur selten verbaut wurden. Probe H1 zeigt klar, daß die Gelbkalke eine besonders geringe Verwitterungsbeständigkeit besitzen; denn der Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes betrug 6. Das bestätigen auch die Aufschlußaufnahmen (siehe unten).

Offensichtlich war dies auch den im Steinbruch Tätigen bekannt, und es wurde deshalb soweit als möglich vermieden, die Gelbkalke zu verbauen. So läßt sich ihre bezüglich ihrer Häufigkeit in der Schichtenfolge zu geringe Verwendung als Baumaterial erklären.

3.2.3. Aufschlußaufnahme im Osnabrücker Wellenkalk

Von den beiden Steinbrüchen am Westerberg, in denen die Mauersteine gebrochen wurden, ist der eine ein Naturschutzgebiet (und deshalb nicht mehr zugänglich) und der andere in den Botanischen Garten der Universität Osnabrück integriert. Um einen besseren Überblick über Stratigraphie und Fazies des Osnabrücker Wellenkalks zu gewinnen und um feststellen zu können, aus welchen Gesteinsbänken das verwitterungsbeständigste Material stammt, wurde im Sommer 1992 der Steinbruch im Botanischen Garten (MTB 3714 Osnabrück, R³⁴ 33700 H⁵⁷ 94700) anhand des von LANGER (1989: Tab. 5, Taf. 1-2) dort aufgenommenen Profils 3 „Westerberg“ untersucht und beprobt. Da die Neuaufnahme das detaillierte Profil von LANGER (1989) bestätigte, wird im weiteren auf eine erneute Darstellung des Profils verzichtet - stattdessen sei auf das Profil 3 „Westerberg“ von LANGER (1989: Taf. 1-2) verwiesen, das in der vorliegenden Arbeit im Kap. 6.2. wiedergegeben wird.

Im Steinbruch im Botanischen Garten ist noch heute die Schichtenfolge von einem höheren Teil des oberen Abschnittes des Wellenkalk-1-Members (höherer Teil des muW1c) über das Oolithbank-Member bis in den mittleren Teil des Wellenkalk-2-Members (tieferer Teil des muW2b) sehr gut aufgeschlossen. [Die lithostratigraphische Nomenklatur folgt HAGDORN, HORN & SIMON (1993).] Dieser Schichtenfolge wurden die Proben B1 bis B17 zur Dünnschliff-Herstellung entnommen. So ließ sich die Verteilung der im Kap. 4.2.1. unterschiedenen Mikrofaziestypen feststellen. Fast alle im Steinbruch auftretenden Gesteinstypen wurden zu Bruchstein verarbeitet, allein die leicht erkennbaren Gelbkalke (Mikrofaziestyp 10) wurden nur selten verwandt. Die Mikrofaziestypen 8 bis 10 kommen in der gesamten Wellenkalk-Formation vor, während der Mikrofaziestyp 5 nur in einer Schillbank des unteren Teils des Oolithbank-Members (muOa) und der Mikrofaziestyp 6 nur in mehreren Lagen im oberen Teil des Oolithbank-Members (muOc) nachgewiesen werden konnte. Typisch entwickelte Bänke des Mikrofaziestyps 7 fanden sich im Steinbruch im Bereich des Wellenkalk-2-Members an der Basis des muW2a und an der Basis des muW2b. Sehr schön lassen sich in dem jetzt mit einem geologischen Lehrpfad versehenen Botanischen Garten die Trockenrisse (in Gesteinen des Mikrofaziestyps 9) im obersten Teil des Wellenkalk-1-Members und eine Schichtfläche in Kalken des Mikrofaziestyps 8 mit zahlreichen Freßbauten von *Rhizocorallium irregulare* MAYER 1954 [in der Artdefinition von FÜRSICH (1974: 23-24)] beobachten.

Der von LANGER (1989: 27) herausgestellte zyklische Aufbau der Wellenkalk-Formation zeigt sich auch in der Verteilung der Mikrofaziestypen: Ein Idealzyklus beginnt an der Basis mit Gesteinen des Mikrofaziestyps 6 (oder 5), darauf folgt der Mikrofaziestyp 7, dann 8 bis 9, und den Abschluß bildet der Mikrofaziestyp 10 (der zurücklaufende Ast ist unterdrückt). Allerdings sind derart vollständige Zyklen selten - als Beispiel mag der die von LANGER (1989: Taf. 2) gezogene Grenze Oolithbank-Member/Wellenkalk-2-Member überschreitende Zyklus gelten -, denn in den im Steinbruch im Botanischen Garten aufgeschlossenen Teilen des Wellenkalk-1-Members und des Wellenkalk-2-Members fehlen immer die Mikrofaziestypen 5 und 6, während im Oolithbank-Member der Mikrofaziestyp 7 unterdrückt ist.

Die Verwitterung der verschiedenen Kalkstein-Typen läßt sich im Steinbruch an verschiedenen Stellen gut beobachten. Der Mikrofaziestyp 10 hat die Neigung, in vieleckige Stücke zu zerfallen - vermutlich ist das neben seiner geringen Verwitterungsbeständigkeit der Grund dafür, daß er nur selten als Baustein verwandt wurde. Die feingeschichteten Kalke und die bioturbaten Kalke (Mikrofaziestypen 7-9) - die den größten Teil der Wellenkalk-Formation bilden - zerfallen zu plattigen Stücken. Demgegenüber sind die Mikrofaziestypen 5 und 6, die im Oolithbank-Member auftreten, verwitterungsbeständiger. Ihre einzelnen Lagen oder Bänke zeigen keine Feinschichtung und verhalten sich wie homogene Körper. Die Verwitterung hat an diesen Bänken weniger Ansatzstellen und präpariert sie deshalb ± deutlich heraus.

In den angewitterten Teilen des Aufschlusses zeigt sich auch gut erkennbar der Übergang von den Mikrofaziestypen 8 und 9 zum Mikrofaziestyp 10: Die an ihrem plattigen Zerfall leicht identifizierbaren Kalke der Mikrofaziestypen 8-9 sind zu Anfang hellgrau und verfärben sich zum Hangenden hin intensiv gelb. Erst danach ändert sich das Gefüge in die stückig zerfallenden, bankigen und nicht plattigen Kalke des typischen Mikrofaziestyps 10. Nach oben bricht die Entwicklung ab und eine neue Sequenz beginnt.

Das Ergebnis der Aufschlußaufnahme lautet, daß die besonders verwitterungsbeständigen - und somit besonders gut zum Steinaustausch geeigneten - Gesteine mit den Mikrofaziestypen 5 und 6 auf zwei geringmächtige Horizonte beschränkt sind, die in die normalen Wellenkalke eingeschaltet sind. Dabei handelt es sich um die Abschnitte muOa und muOc des leicht (wieder-) erkennbaren Oolithbank-Members.

3.3. Beisinghäuser Kalk (Devon) von Eslohe

In der engeren Umgebung von Eslohe-Reiste im nördlichen Sauerland besaß der Beisinghäuser Kalk in der Vergangenheit eine große Bedeutung als Naturbaustein, da er leicht zugänglich und - aufgrund seiner Bankung - leicht abbaubar war. Aus diesem Grund gab es südlich und südwestlich von Eslohe-Reiste mehrere Steinbrüche, in denen er abgebaut wurde (siehe 3.3.2.). Der Beisinghäuser Kalk ist ein hauptsächlich aus Crinoidenresten bestehender Riffschutt-Kalk, dessen Ablagerung im höheren Givetium (Mitteldevon) begann und im untersten Frasnium (Oberdevon) endete (siehe EBERT & MÜLLER 1973: 103-105). Zwar ist er in typischer Weise nur in der Umgebung von Eslohe-Reiste entwickelt, aber er besitzt große lithologische Ähnlichkeit mit dem Belgischen „Granit“, einem häufig verwandten, an Crinoidenresten reichem, unterkarbonischen Kalkstein (KUPPER & PISSART 1974: 39-40; KUPPER 1975; NIJS 1985: 15; MÜLLER 1987: 379), und in beschränktem Umfang auch mit dem „Aachener Blaustein“. Der „Aachener Blaustein“ umfaßt neben oberdevonischen Riffkalcken (GRIMM 1990: Bildtaf. 159) auch Gesteine des Kohlenkalks, die dem Beisinghäuser Kalk besser entsprechen. Deshalb ist zu erwarten, daß die Ergebnisse der Untersuchung des Beisinghäuser Kalkes ± weitgehend auf diese häufig verwandten und weit verbreiteten Gesteine übertragbar sind.

3.3.1. Probenkollektiv P: Kirche St. Pankratius in Eslohe-Reiste

In der Mitte des in einem Tal gelegenen Ortes Reiste steht die 1849 in neugotischem Stil erbaute katholische Kirche St. Pankratius (MTB 4715 Eslohe, R³⁴ 47050 H⁵⁶ 81235). Das Kirchenschiff verläuft von Südwesten nach Nordosten; der Turm befindet sich am Südwest-Ende. Das Gebäude wurde fast vollständig aus Beisinghäuser Kalk erbaut; nur Sockel, Portale, Fenstergewände usw. bestehen aus Sandsteinen. Wie in vielen anderen historischen Bauwerken ist die Mauer zweischalig: Eine Gerüstetage hoch wurden eine Außen- und eine Innenschale aus quaderförmigen Natursteinen aufgemauert und die Lücke dazwischen mit Steinabfall und Flußkies gefüllt; als Abschluß jeder Gerüstetage wurde durchgemauert, um Außen- und Innenschale miteinander zu verbinden und so die Stabilität der Mauer zu erhalten. Die Fugen zwischen den Mauersteinen wurden mit einem festen Mörtel verschlossen.

Da das an der Kirche St. Pankratius beobachtete Schadensbild kein Einzelfall ist (siehe z. B.: Kap. 3.4.1.), wird dieser Schadensfall im folgenden beispielhaft dargestellt: Obwohl oberflächliche Verwitterung und Schädigung der Mauersteine sehr gering sind - man kann noch die Bearbeitungsspuren der Steinmetze erkennen -, haben zahlreiche Mauersteine deutlich sichtbare Risse (siehe Taf. 1 + 3), einige durch diese Risse herausgelöste Bruchstücke sind schon heruntergefallen - durch derartige Ausbrüche besteht eine potentielle Gefahr für Kirchenbesucher - und im Innenraum der Kirche beobachtet man Vernässungszonen auf der Wand.

Diese gravierenden Schäden führten zu der 1992 begonnenen Renovierung: Die Außenschale des Mauerwerks wird vollständig abgetragen und eine neue Außenschale aufgemauert. Sehr wichtig ist in diesem Zusammenhang natürlich die Frage, wie es zur Entstehung dieser Risse kam. Die verschiedentlich geäußerte These, daß sämtliche in der Mauer von St. Pankratius beobachtbaren Risse durch Mängel in der Statik des Bauwerks - also die gewichtsmäßige Überbeanspruchung einzelner Bauteile - entstanden, ist nicht haltbar; denn für statische Risse sind folgende Merkmale typisch:

- Sie verlaufen über einen Mauerstein hinaus.
- Sie durchschlagen Mauerstein und Mörtel in vergleichbarer Weise.
- Normalerweise tritt in einem Mauerstein nur ein Riß auf, der $\pm$ gerade durchläuft.
- Sie treten an besonders statisch belasteten Stellen auf.

Natürlich gibt es im Mauerwerk einige statische Risse, auf die diese Merkmale zutreffen. Sie sind aber in einer zu vernachlässigenden Minderzahl. Für die weit überwiegende Mehrzahl der Risse gilt:

- Sie sind auf einen Mauerstein beschränkt (siehe Taf. 1).
- Ein Mauerstein zeigt meist mehrere, $\pm$ feine Risse, die oft ein polyedrisches Muster bilden (siehe z. B. Taf. 1 Fig. 3).
- Man findet sie bei genauer Betrachtung fast überall an der Kirche und somit auch an vielen Stellen ohne besondere statische Belastung.
- Sie sind besonders häufig und gut entwickelt an besonders intensiv exponierten (also dem Wetter ausgesetzten) Stellen: An den äußeren Abschnitten der Stützpfiler sind Risse häufiger als an den geschützten Abschnitten zwischen den ziemlich dicht stehenden Stützpfilern. Die nach Westen orientierte Seite eines Stützpfilers zeigt mehr und stärker entwickelte Risse als die Ostseite. Die nach Südwesten exponierte Vorderseite des Turms ist besonders stark geschädigt.

Obwohl diese Phänomene sehr deutlich auf witterungsbedingte Risse verweisen, könnte man versucht sein, sie auf Kantendruck zurückzuführen; denn z. T. verjüngen sich die Steine nach innen und liegen innen nur auf nachgiebigem Kies. In dem Fall sollten sich aber Abschalungen - also oberflächenparallele Absonderungen - beobachten lassen. Da sich aber nirgends Abschalungen fanden, müssen die Risse in den Mauersteinen auf Witterungseinflüssen und/oder Feuchtigkeit im Mauerwerk beruhen. Daß Feuchtigkeit im Mauerwerk eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt, läßt sich an folgenden Umständen erkennen:

- Es gibt Vernässungszonen im Innenraum der Kirche.
- Die bei der Renovierung des Turms beobachtete Auswaschung von Füllmaterial aus dem Zwischenraum zwischen der Außen- und der Innenschale der Mauer läßt sich auf in diesem Zwischenraum zirkulierendes Wasser zurückführen.
- Der Umstand, daß der Fugenmörtel nur noch außen hart und fest, innen aber weich und sehr mürbe ist, ist möglicherweise ebenfalls auf die auslaugende Wirkung von im Zwischenraum zirkulierendem Wasser zurückzuführen.
- Entlang gut entwickelter Risse beobachtet man häufig schmale Gipskrusten, deren Begrenzung auf die engste Umgebung des jeweiligen Risses sich nur durch die Ausscheidung aus wäßrigen Lösungen erklären läßt, die aus dem Riß nach außen sickerten (siehe z. B. Taf. 1 Fig. 3, Taf. 3 Fig. 2).
- An einem Fenster im Turm trat sehr starke tropfsteinförmige Sinterbildung auf.

Das Mauerwerk bietet aufgrund seines zweischaligen Baus dem Wasser gute Möglichkeiten, sich im Zwischenraum zwischen Außen- und Innenschale schnell überall auszubreiten und das Mauerwerk zu schädigen, in dem es Stoffe transportiert und - z. B. bei Frost durch Frostsprengung - Risse (im Gestein, im

Fugenmörtel und zwischen Gestein und Fugenmörtel) aufweitet und/oder erzeugt. Doch wie konnte das Wasser in das zweischalige Mauerwerk überhaupt in nennenswertem Umfang eindringen? Hierbei spielen sicherlich auch Konstruktionsmängel eine Rolle:

- Der besonders stark geschädigte Turm zeigt an seiner Vorderseite (Südwest-Seite) eine großflächige Ausbuchtung, in deren Bereich die Mauer herablaufendes Regenwasser leichter ins Mauerwerk eindringen kann als an den exakt senkrechten Mauerteilen.
- Die Dachflächen der Stützpfeiler wurden vermutlich erst nachträglich mit Zinkabdeckungen versehen, so daß dort lange Zeit Wasser relativ leicht ins Mauerwerk einsickern konnte.

Das allein reicht aber nicht zur Erklärung aus, denn die erwähnte besonders häufige und gute Entwicklung der Risse auf der Wetterseite (SW bis W) belegen die Bedeutung der Witterung. Vermutlich wurden durch witterungsbedingte Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen Risse erzeugt (oder geöffnet), durch die dann Wasser ins Mauerwerk eindringen konnte. Mittels Frostsprengung öffnete dann dieses Wasser die Risse weiter und erleichterte damit weiteren (bzw. neuerlichen) Wassereintritt ins Mauerwerk - ein Teufelskreis hatte begonnen. Aufgrund der zweischaligen Bauweise der Mauer konnte sich das Wasser im Mauerwerk weit ausbreiten und auch Schäden an wettergeschützteren Stellen der Mauer erzeugen.

Da der Turm der Kirche besonders starke Schäden zeigte, begann die Renovierung 1992 dort. Im Rahmen dieser Renovierung konnte im Oktober 1992 das Probenkollektiv P der nach Südwesten exponierten Vorderseite des Turms aus einer Höhe von 18 m bis 20 m über dem Erdboden entnommen werden. Die der Auswahl des Probenkollektivs vorgeschaltete Begehung des Turmes zeigte, daß auf der Kante zwischen Südwest- und Nordwest-Seite bzw. Südwest- und Südost-Seite schon einmal ein Steinaustausch erfolgt war; denn zum einen waren bei den Steinen im Kantenbereich die Bearbeitungsspuren viel schärfer und stärker ausgeprägt, und zum anderen waren diese Steine mit einem andersartigen, harten Mörtel (ein Zementmörtel) verfugt (siehe Taf. 1 Fig. 1). Die Mauersteine auf der Fläche der Südwest-Seite sind ursprünglich bei der Errichtung verbaute Steine und werden deshalb im weiteren als Generation 1 bezeichnet (Expositionsdauer 143 Jahre). Demgegenüber sind die Steine im Kantenbereich erst viel später eingebaut worden - sie bilden die Generation 2. Die Mauersteine der Generation 2 wurden 1963/1964 eingebaut (Expositionsdauer 29 Jahre) [freundliche mündliche Mitteilung des zuständigen Architekten, Herrn F.-J. Happe, vom 18.1.1994]. Um beide Mauerstein-Generationen miteinander vergleichen zu können, wurden bei der Aufsammlung des Probenkollektivs P neben 20 Mauersteinen der Generation 1 auch 10 Mauersteine der Generation 2 entnommen. Die Mauersteine der Generation 2 bestehen aus demselben Gestein wie die der Generation 1, und die im Gefüge-Index ausgedrückte Schädigung der Mauersteine in der Generation 2 ist im Durchschnitt erheblich geringer als die der Generation 1.

Da sämtliche Proben des Probenkollektivs P - 30 Mauersteine (P1-30) - aus einem Bereich 18-20 m über dem Erdboden entnommen wurden, bestand keine Gefahr einer Beeinflussung durch Grundfeuchte. Abgesehen von der Umrahmung des auf dieser Höhe befindlichen Fensters durch kretazischen Grünsandstein war auf der Außenseite nur Beisinghäuser Kalk und kein anderer Stein vermauert. Fast alle Mauersteine waren lagerhaft verbaut, nur wenige waren auf Spalt gesetzt. Die Größe der auf der Außenseite der Mauer verwandten Steine war sehr variabel; ihre Länge betrug 21-46 cm, ihre Höhe 15-36 cm und ihre Tiefe 18-39 cm (arithmetische Mittel siehe Tabelle 1). Ihr Bearbeitungszustand ist in allen Fällen bruchrauh; sie zeigen auf den eingebauten Seiten keine Spuren einer weiteren Bearbeitung durch Steinmetze. Nur auf der Außenseite sind größere Unebenheiten mit einem Spitzstein entfernt worden (siehe Taf. 3 Fig. 1-4). Ober- und Unterseite jedes Mauersteins werden durch Bankfugen gebildet, ansonsten sind die Mauersteine $\pm$ unregelmäßig quaderförmig. Es sind mittelgraue Kalksteine, die hellgrau anwittern. Die sedimentäre Schichtung läßt sich nur an der weitständigen Bankung und an Materialwechseln erkennen, denn die senkrecht zur Schichtung verlaufenden Risse sind im allgemeinen häufiger und/oder besser entwickelt als die parallel dazu verlaufenden. Die Außenseite der Steine zeigt in wechselndem Umfang hell- bis dunkelgraue Gipskrusten, die in Form von kleinen „Wällen“ bis „Perlschnüren“ entlang von Rissen verlaufen (siehe z. B. Taf. 1 Fig. 3). An Steinen der Generation 1 beobachtet man diese Krusten ziemlich häufig und $\pm$ stark entwickelt, während sie bei Steinen der Generation 2 nur selten und schwach ausgeprägt auftreten. Desweiteren sind auf den Außenseiten der Mauersteine der Generation 1 die Bearbeitungsspuren nur noch verwaschen zu erkennen, während die Generation 2 diese Bearbeitungsspuren erheblich prägnanter zeigt (siehe Taf. 1 Fig. 1 und Taf. 3 Fig. 1-4).

3.3.2. Aufschlußaufnahme im Beisinghäuser Kalk

Etwa ein Kilometer südlich von Reiste (bzw. fast ein Kilometer östlich von Beisinghausen) ist der Beisinghäuser Kalk noch heute in zwei Steinbrüchen aufgeschlossen. In beiden Steinbrüchen wurden von GAUGLITZ (1967: 23, Abb. 11) Profile aufgenommen.

Den Steinbruch an der Straße (MTB 4715 Eslohe, R³⁴ 47650 H⁵⁶ 80400) erlebte noch MÜLLER (in EBERT & MÜLLER 1973: 101, Abb. 9) gut aufgeschlossen. Die von GAUGLITZ (1967: 23) untersuchte Conodontenführung erweist eine Einstufung der Kalke in einen höheren Teil der Unteren *asymmetricus*-Zone bis an die Grenze Mittlere/Obere *asymmetricus*-Zone. Sie besitzen damit auch nach der Neudefinition der Untergrenze des Frasniums (siehe: ZIEGLER & KLAPPER 1985; ZIEGLER & WERNER 1985) noch ein oberdevonisches Alter. Bei meinen Aufschlußaufnahmen im Sommer 1992 war der Steinbruch schon fast völlig zugekippt und nur im obersten Teil der westlichen Steinbruchswand war ein ca. 4 m mächtiges Paket nach Südosten einfallender bankiger bis dickbankiger, grauer Kalksteine aufgeschlossen. Es handelte sich um den obersten Teil des von GAUGLITZ (1967: Abb. 11, rechtes Profil) aufgenommenen Profils. In diesem Kalkstein-Paket ließen sich weder auffällige Schichtung oder auffällige Korngrößenschwankungen noch Zwischenmittel oder gar Tonschiefer-Lagen beobachten. Die Bankung der Kalksteine beruhte nur auf Fugen, die zum Teil erst im Verlaufe der Verwitterung offen und sichtbar wurden. Deshalb schwankte die Dicke der Bänke (je nach Verwitterungsgrad) zwischen 13 cm und 90 cm. Beim Herausschlagen aus dem Fels brach das Gestein oft an $\pm$ unregelmäßig angeordneten Klüften; aber nur im obersten angewitterten Teil führten diese Klüfte zu einem Zerfall des Gesteins. Dem aufgeschlossenen Gestein wurden die Proben R1-R5 entnommen und daraus Dünnschliffe angefertigt. In den Dünnschliffen finden sich nur die Mikrofaziestypen 12 und 14. Darüber hinaus zeigen R4 und R5, die dem obersten Meter des Aufschlusses entnommen wurden, eine auf tektonischer Auswalzung beruhende starke Längung der Bioklasten und anderen Partikel.

Ein kleinerer, aber auch heute noch ziemlich gut erhaltener Steinbruch befindet sich westlich vom oben beschriebenen Steinbruch im Wald (MTB 4715 Eslohe, R³⁴ 47500 H⁵⁶ 80380). Der gesamte in der Kirche St. Pankratius verbaute Beisinghäuser Kalk entstammte diesem Steinbruch im Wald, wie mir Einheimische berichteten. Auf der Südost-Seite des kleinen und sehr verwachsenen Steinbruchs ist in einer Steilwand ein fast waagrecht liegender, ca. 7 m mächtiger Teil des Beisinghäuser Kalkes gut aufgeschlossen (vgl. GAUGLITZ 1967: Abb. 11, unteres Profil). GAUGLITZ (1967: 23) schreibt, daß das gesamte Profil der Unteren *asymmetricus*-Zone [= Unterste und Untere *asymmetricus*-Zone im heutigen Sinne] angehört. Unter Berücksichtigung der Neudefinition der Untergrenze des Frasniums lassen sich deshalb diese Kalksteine dem Grenzbereich Mitteldevon/Oberdevon zuordnen. Das Gestein ist gut gebankt; die Dicke schwankt zwischen verschiedenen Bänken von 4 cm bis 70 cm. Vereinzelt lassen sich im Kalkstein in Lagen angeordnete schwarze Kieselknollen (= „Hornsteine“) beobachten. Im Dünnschliff erkennbare Feinschichtungen schlagen sich nicht in Schichtflächen nieder. Gelegentlich lassen sich zwischen den Kalkbänken 0,5-2 cm dicke Lagen aus plattigen Kalkmergeln oder dunklen Tonmergeln beobachten. Als Hinweis auf subaquatische Rutschungen und/oder Turbidite kann man das häufige Auftreten folgender Merkmale in den Kalkbänken werten: gradierete Schichtung, wellige Bankfugen sowie schwankende Mächtigkeit der Bänke (vereinzelt sogar Auskeilen). Auch die Hornsteine sprechen nicht gegen die Interpretation als Turbidite, da MEISCHNER (1964: 159, 162) und EBERLI (1991: 344) sie häufig in Kalkturbiditen fanden. Die aufgeschlossenen Kalksteine zeigen gut entwickelte Klüfte und große sparitverheilte Risse. Da zum einen sich alle makroskopisch erkennbaren Gesteins- und Banktypen mehrfach in der aufgeschlossenen Schichtenfolge wiederholen und zum anderen eine Beprobung der oberen Teile der Steilwand sehr gefährlich gewesen wäre, wurden den unteren 3,5 m des Profils die Proben R6-R13 zur Dünnschliff-Herstellung entnommen. Unter den Dünnschliffen sind die Mikrofaziestypen 11, 12, 13 und 14 in ähnlicher Häufigkeit wie in der Generation 1 des Probenkollektivs P vertreten. Dieser Umstand bestätigt zum einen, daß das Baumaterial für St. Pankratius hierher kam; außerdem zeigt es, daß die Entnahme der ursprünglichen Bausteine anscheinend nicht sehr selektiv erfolgte. Der Arbeitsaufwand einer genauen Aufnahme der stratigraphischen Verteilung der Mikrofaziestypen ist nicht gerechtfertigt, da sich die Mikrofaziestypen nicht sehr in ihrer Verwitterungsbeständigkeit unterscheiden.

3.4. Oberer Muschelkalk von Oerlinghausen

Naturbausteine des ostwestfälischen Oberen Muschelkalks werden neben dem Probenkollektiv S aus Bielefeld - das aus Trochitenkalk sensu stricto besteht - durch ein weiteres Probenkollektiv aus dem Bereich der Stadt Oerlinghausen in der südöstlichen Fortsetzung des Teutoburger Waldes repräsentiert. Allerdings ist in Ost-Westfalen damit zu rechnen, daß neben dem Trochitenkalk sensu stricto auch der in diesem Gebiet im Aussehen, der Verwendbarkeit und der räumlichen Verbreitung sehr ähnliche Terebratelkalk als Baustein verwandt wurde. Der von verschiedenen Autoren (siehe z. B.: ROSENFELD 1982: 9; NOLTE 1982: 48-49; LUTHER 1982: 84-85; DUCHROW & GROETZNER 1984: 192; SCHWENKE 1993) als „Oberer Trochitenkalk“ bezeichnete Terebratelkalk ist stratigraphisch etwas jünger als der Trochitenkalk sensu stricto (vgl. z. B.: ROSENFELD 1978: Abb. 4; DUCHROW & GROETZNER 1984: 186-187) und bildet als

„Osnabrück-Member“ den obersten Teil der Trochitenkalk-Formation im Sinne von HAGDORN, HORN & SIMON (1993: 44).

3.4.1. Probenkollektiv E: Evangelisch-reformierte Kirche in Helpup

Das Probenkollektiv E wurde der evangelisch-reformierten Kirche in Helpup (MTB 4018 Lage, R³⁴ 80250 H⁵⁷ 59540), einem Ortsteil der Stadt Oerlinghausen entnommen. Der Bau dieser Kirche wurde am 31.8.1906 begonnen, das Richtfest fand am 22.4.1907 statt, und die Einweihung erfolgte am 20.3.1908 (SCHMIDT 1983: 11, 14). Die Kirche wurde fast vollständig aus Kalksteinen der Trochitenkalk-Formation erbaut; nur Portale und Fenstergewände usw. bestehen aus Sandsteinen. Obwohl das Gestein in der nächsten Umgebung gebrochen wurde, ließ sich der Herkunftssteinbruch nicht sicher eruieren.

Das Schadensbild der evangelisch-reformierten Kirche in Helpup läßt sich sehr gut mit dem der katholischen Kirche St. Pankratius in Eslohe-Reiste vergleichen (siehe Kap. 3.3.1.), so daß hier nur noch knapp darauf eingegangen werden muß: Die Mauer ist zweischalig; auf der Außenseite zeigen zahlreiche Mauersteine deutlich sichtbare Risse, einige durch diese Risse herausgelöste Bruchstücke sind schon heruntergefallen und im Innenraum der Kirche beobachtet man Vernässungen. Die außen sichtbaren Schäden sind auf der West-Seite am stärksten entwickelt. Obwohl diese Schäden schon 1991 offensichtlich waren, konnte die Renovierung erst 1993 beginnen. Im Zuge der Arbeiten wird auf der West-Seite die Außenschale des Mauerwerks vollständig abgetragen und eine neue Außenschale aufgemauert. Da in der weiteren Umgebung heute kein Trochitenkalk (und kein Terebratelkalk) mehr als Werkstein gebrochen wird, muß für den Steinersatz auf den süddeutschen Muschelkalk zurückgegriffen werden.

Daß diese schwere Schädigung des Gesteins und des Mauerwerks nicht allein an einer zu geringen Verwitterungsbeständigkeit des verwandten Kalksteins liegen kann, zeigt nicht nur die allgemein gute Verwitterungsbeständigkeit des norddeutschen Trochitenkalks (STEIN 1981: 7; 1983: 114), sondern auch der Vergleich mit dem Probenkollektiv S - immerhin war das aus Trochitenkalk bestehende Probenkollektiv S mindestens 342 Jahre der Verwitterung ausgesetzt, während sich für das Probenkollektiv E nur 86 Jahre Expositionsdauer ergeben. Ein auffälliger und gravierender bautechnischer Fehler besteht darin, daß die Fugen zwischen den Mauersteinen außen mit einem harten und wenig wasserdurchlässigen Zementmörtel verfügt wurden, während sich im restlichen Teil der Fugen und im Raum zwischen Außen- und Innenschale eine gelbe, weiche, poröse und sehr sandreiche Füllung befindet. Im sehr spröden und nur wenige Zentimeter dicken Zementmörtel konnten relativ leicht Risse entstehen, die Niederschlagswasser - z. B. bei Schlagregen - Eingang in das Mauerwerk ermöglichten (vgl. z. B.: SAUDER & WIESEN 1987: 20; MEISEL 1988: 50-51). Dieses Wasser konnte zwar im Mauerwerk selbst aufgrund der porösen Füllung gut wandern, aber aufgrund des wenig porösen Zementmörtels nur schwer wieder verdunsten (vgl. z. B. DOLL 1978: 1712). Die infolge der Durchfeuchtung gestiegene Frostempfindlichkeit des Mauerwerks führte zu verstärkter Rißbildung in Gestein und Fugenmörtel. Die Erkenntnis, daß das Wasser durch die Risse ins Mauerwerk eindringt, führte dazu, daß man vor 10 Jahren auf zahlreiche Risse in der West-Seite der Kirche Silikon-Masse schmierte. Dieser gutgemeinte Versuch muß rückblickend sehr kritisch betrachtet werden, weil durch diese Silikon-Masse weniger der Wassereintritt als der Wasseraustritt aus dem Mauerwerk behindert wurde.

Im Verlaufe der Renovierungsarbeiten konnte im Mai 1993 mitten auf der Außenseite der westlichen Mauer des Kirchenschiffes in 8,5-10 m Höhe nördlich des großen Rosettenfensters das Probenkollektiv E entnommen werden. Neben dem Umstand, daß in dieser Höhe nicht mehr mit dem Einfluß von Grundfeuchte zu rechnen war, sprachen noch weitere Umstände für diese Stelle: Der gesamte Abschnitt bestand ausschließlich aus Kalksteinen der Trochitenkalk-Formation, und fast alle Mauersteine waren lagerhaft verbaut, nur wenige (meist kleine) Steine waren auf Spalt gesetzt. Es ließen sich zwar zwei verschiedene Fugenmörtel auf der Außenseite der Mauer unterscheiden, aber es fand sich kein Hinweis auf Steinaustausch. In diesem Bereich der Mauer waren nur selten Risse mit Silikonmasse von außen verschlossen und es fanden sich auch keine klaren Anzeichen für statische Risse.

Die Größe der im Bereich des Probenkollektivs E auf der Außenseite der Mauer verwandten Steine war sehr variabel; ihre Länge betrug 9-83 cm, ihre Höhe 4-25 cm und ihre Tiefe 11-37 cm (arithmetische Mittel siehe Tabelle 1). Der Bearbeitungszustand der ± unregelmäßig (bis unregelmäßig quaderförmig) gestalteten Mauersteine ist in allen Fällen bruchrauh (siehe Taf. 2 Fig. 7 und Taf. 3 Fig. 5-6). Ober- und Unterseite der Mauersteine beruhen auf Bankfugen und sind deshalb ziemlich eben. Es sind hellgraue Kalksteine, die hell anwittern. Im Zuge der verwitterungsbedingten Reliefbildung können Schalen und andere Fossilreste herauswittern, sie können aber auch - etwas seltener - zurückwittern und Hohlräume in der Matrix bilden. Braunschwarze bis grünscharze Krusten treten gelegentlich auf; sie sind immer dünn und bedecken nur einen kleinen Teil der Außenseite des Mauersteins (vgl. BLASCHKE 1989: 29-30; BLASCHKE & JULING

1992: 300-303). In den Mauersteinen des Probenkollektivs E sind normalerweise die parallel zur Schichtung verlaufenden (Haar-)Risse häufiger und besser entwickelt als die senkrecht zur Schichtung verlaufenden Risse. Die durchgeführte Aufschlußaufnahme und die Mikrofazies-Analyse (siehe Kap. 4.2.1.) der Mauersteine des Probenkollektivs E zeigten, daß es sich um Kalksteine aus dem Terebratelkalk handelte. Demgegenüber hatten sich im Jahre 1991 an anderer Stelle auf der Westseite der evangelisch-reformierten Kirche in Helpup entnommene Proben als für den Trochitenkalk sensu stricto typische Gesteine erwiesen. Vermutlich variierte das Verhältnis Trochitenkalk zu Terebratelkalk bei den Mauersteinen in verschiedenen Bauphasen.

3.4.2. Aufschlußaufnahme im Oberen Muschelkalk bei Helpup

Da sich die 1991 an der Helpuper Kirche entnommenen Proben als typischer Trochitenkalk erwiesen hatten, stellte sich bei der Entnahme des Probenkollektivs E die Frage, inwieweit auch dieses Material dem Trochitenkalk entstammte und welchen Anteil andere Kalksteine des Oberen Muschelkalks daran besaßen. Diese Frage ließ sich nur durch eine Beprobung des Trochitenkalks in der Umgebung von Helpup klären.

Im Rahmen seiner Kartierung der Umgebung von Helpup stellt BUSER (1981: 50) fest, daß der – von ihm als „Unterer Trochitenkalk“ bezeichnete – Trochitenkalk sensu stricto in diesem Gebiet als geschätzter Baustein an vielen Stellen abgebaut wurde, aber Aufschlüssen im Trochitenkalk immer seltener werden. Da mir nur bekannt ist, daß das Material zum Kirchenbau aus der engeren Umgebung stammte, wurde im Mai 1993 als nächstgelegener und deshalb wahrscheinlichster Aufschluß im Trochitenkalk der ehemalige Steinbruch westlich der Straße Helpup-Währentrop (MTB 4018 Lage, R³⁴ 80200 H⁵⁷ 59050) untersucht, der durch das Vorkommen von Galenit (PbS) in Kalzitgängen bekannt ist (siehe HOFMEISTER et al. 1972: 20).

In diesem Steinbruch sind an mehreren Stellen die obersten 4 m des Trochitenkalks und der unterste Meter der „Älteren Tonplatten“ [= Vinsebeck-Member der Trochitenkalk-Formation in der Gliederung von HAGDORN, HORN & SIMON (1993)] aufgeschlossen. Der Trochitenkalk ist hell, bankig (Bankdicke 10-30 cm), trochitenführend und enthält in seinem oberen Teil eine auffällig trochitenreiche Bank. Den obersten 3,5 m des Trochitenkalks wurden in gleichmäßigen Abständen von unten nach oben die Proben He 1-5 entnommen. Die Proben He 1-3 sind Vertreter der Mikrofaziestypen 3 und 4, während die Proben He 4 und He 5 zwischen den Mikrofaziestypen 1 und 3 vermitteln. Die darüber folgenden „Älteren Tonplatten“ bestehen aus hellen, plattigen bis bankigen, 5-20 cm dicken Kalkstein-Schichten, die vergleichbar dicke Mergelzwischenlagen voneinander trennen. Der untersten dicken Kalkbank der „Älteren Tonplatten“ entstammt die Probe He 6, während die Probe He 7 einer etwas darüber folgenden relativ dicken Kalkbank entnommen wurde. Die Dünnschliff-Untersuchung erwies die Probe He 6 als Grainstone aus Bioklasten von Echinodermen, Muscheln und Gastropoden. Die Probe He 7 – ein gradierter Floatstone – ist ein artenarmer Sturmschill aus primär aragonitischen Muschel-Schalen.

Die mikrofazielle Übereinstimmung zwischen den Proben He 1-5 und Mauersteinen des Probenkollektivs S ist eine weitere Bestätigung dafür, daß das Probenkollektiv S von der Sparrenburg aus Trochitenkalk besteht. Da sich keine mikrofazielle Übereinstimmung zwischen den Proben He 1-5 und den Mauersteinen des Probenkollektivs E erkennen läßt, können die Mauersteine des Probenkollektivs E aus der Kirche in Helpup nicht dem Trochitenkalk dieses Steinbruchs entstammen. Sehr wahrscheinlich kommen die Mauersteine des Probenkollektivs E überhaupt nicht aus dem Trochitenkalk. Den Proben He 6 und He 7 mikrofaziel entsprechend Mauersteine sind aus keinem der untersuchten Probenkollektive bekannt. Anscheinend wurden die Kalksteinbänke der „Tonplatten“ nicht oder nur selten als Mauersteine verwandt.

BUSER (1981) konnte in der Umgebung von Helpup stellenweise den – von ihm als „Oberer Trochitenkalk“ bezeichneten – Terebratelkalk auskartieren. Leider gibt es keine Aufschlüsse in ihm, so daß mir eine Beprobung unmöglich war.

4. Ergebnisse der Untersuchung der Probenkollektive

Im Kapitel 2. wurden die angewandten Methoden diskutiert und beschrieben. Das folgende Kapitel stellt die Ergebnisse der Anwendung dieser Methoden auf die Probenkollektive dar. Tabelle 1 liefert eine Zusammenstellung aller erfaßten Gesteinsparameter der Probenkollektive K, S, P und E. Neben den schon eingeführten Parametern finden sich auch einige Indizes – sie werden an den entsprechenden Stellen erläutert.

Die Mauersteine des Probenkollektivs K (Schwesternhaus der ehemaligen Städtischen Kliniken Osnabrück; Osnabrücker Wellenkalk) tragen die Nummer K1 bis K41, die des Probenkollektivs S (Burg Sparrenberg bei Bielefeld; Trochitenkalk) die Nummer S1 bis S17, die des Probenkollektivs P (Kirche St. Pankratius in Eslohe-Reiste; Beisinghäuser Kalk) die Nummer P1 bis P30 und die des Probenkollektivs E (evangelisch-reformierte Kirche in Helpup; Terebratelkalk) die Nummer E1 bis E30.

Ohne der gründlichen Diskussion vorgreifen zu wollen, soll schon an dieser Stelle ein folgenschweres Ergebnis der Untersuchungen genannt werden: Das Probenkollektiv S ist mit seinen 17 Steinen schon zu klein, um Korrelationen gut zu zeigen - es lassen sich zwar Trends erkennen, aber eine hinreichende Sicherheit haben sie nur selten. Demgegenüber ist das Probenkollektiv K mit 41 Steinen zur Erkennung deutlicher Korrelationen groß genug. Daraus ließ sich der Schluß ziehen, daß ein Probenkollektiv nicht kleiner als 25-30 Steine sein sollte - eine Vorgabe, die die Auswahl geeigneter Standorte weiter erschwerte.

4.1. Ergebnisse der äußeren Begutachtung und der Präparation der Mauersteine

Als ein erstes wichtiges Ergebnis kann gelten, daß die hier untersuchten Kalksteine anders verwittern, als man es von Sandsteinen und Kalksandsteinen gewohnt ist; denn die Schädigung der Oberfläche und der oberflächennahen Bereiche der Mauerstein-Außenseite spielt nur eine untergeordnete Rolle. Diese Naturbausteine wurden bruchrauh - d. h. im roh behauenen Zustand - eingebaut und nicht weiter bearbeitet; deshalb fällt eine oberflächliche Abtragung von maximal mehreren Millimetern nicht sonderlich ins Gewicht. Daß die Oberflächenabtragung bei den untersuchten Kalksteinen gering bis sehr gering ist, zeigt auch der Umstand, daß die Außenseiten der Mauerstein-Generation 1 des Probenkollektivs P nach einer Expositionsdauer von 143 Jahren immer noch Bearbeitungsspuren zeigen. Die Schäden an der Außenseite sind bestenfalls ein „kosmetisches“ Problem, da sich an den untersuchten Probenkollektiven neben einer allgemein verbreiteten Bleichung der Kalksteine nur eine ziemlich geringe Reliefbildung und eine $\pm$ geringe Krustenbildung beobachten ließen.

Viel gravierender ist die Schädigung des inneren Zusammenhaltes des Mauersteins durch Risse, die die Statik des Gebäudes gefährdet und unter Umständen zu herabfallenden Bruchstücken führen kann - wie es z. B. bei den Kirchen in Reiste (Kap. 3.3.1.) und Helpup (Kap. 3.4.1.) geschehen ist. Die Ansicht, daß die Schädigung des inneren Zusammenhaltes des Mauersteins die wesentliche Verwitterungsschädigung der untersuchten Kalksteine ist, wurde mir nicht nur von Architekten und örtlichen Denkmalpflegern bestätigt, sondern wird auch durch Angaben von DE QUERVAIN (1945: 19-21, 42-43), MARSCHNER (in KLEMM 1980: 137) und WIHR (1986: 56-58) unterstützt. In logischer Konsequenz wird im weiteren die Stärke der Schädigung des inneren Zusammenhaltes des Mauersteins als Maßstab für den Verwitterungszustand eines Mauersteins verwandt; diese Schädigung wird mit dem Gefüge-Index und dem korrigierten Gefüge-Index gemessen, die in den folgenden Unterkapiteln hergeleitet und erläutert werden.

Die auf den Flächen des ausgebauten Mauersteins erkennbaren Risse durchziehen oft den gesamten Mauerstein. Sie sind vielfach deutlich in Scharen angeordnet und können eng (≤ 1 cm Abstand) bis weit (≥ 20 cm Abstand) geschart sein. Je nach Gestein können schichtparallele oder dazu senkrechte Risse überwiegen. Wenn in einem Riß ein Spaltraum erkennbar ist, ist dieser Zwischenraum normalerweise sehr schmal (< 1 mm). Zum Verständnis der Rißgenese ist wichtig, daß nicht selten die Risse nahe der Außenseite des Mauersteins häufiger und besser entwickelt sind als im Rest des Mauersteins.

4.1.1. Gefüge-Index und Grad der Oberflächenschädigung

Es stellte sich sehr schnell heraus, daß weder der Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes (siehe Kap. 2.3.), noch der Grad der Schädigung bei der Präparation für sich allein genommen in der Lage sind, den inneren Zustand des Gesteinsgefüges hinreichend zu beschreiben; denn beide sind subjektiv und hängen in unterschiedlichem Umfang von störenden Randbedingungen ab. Zwischen beiden Parametern besteht aber ein enger Zusammenhang: Beide geben deutliche Hinweise auf den inneren Zusammenhalt des Steins; und wenn beide Parameter dem inneren Zustand des Gesteinsgefüges eine „schlechte Note“ geben, so ist das schwerwiegender, als wenn nur einer von beiden dies tut. Aus diesen Überlegungen heraus wurde nach einer einfachen Formel ein Gefüge-Index entwickelt, der den inneren Zusammenhalt des Gesteins besser bewertet als die beiden Parameter, auf denen er beruht. Prinzipiell gibt es sowohl die Möglichkeit einer multiplikativen Verknüpfung der beiden Parameter Grad der Gefährdung des Gesteinszu-

Tabelle 1: Vergleich der untersuchten Kalkstein-Naturbausteine (Probenkollektive K, S, P und E). Übersicht über die an den Mauersteinen und ihrem Gestein erfaßten Parameter.

Erläuterungen zu den Parametern werden in Kap. 2. und 4. gegeben.

Abkürzungen: PK = Probenkollektiv; Minim. = Minimum; Maxim. = Maximum; arith. M. = arithmetisches Mittel;

P1 = Probenkollektiv P, Generation 1; P2 = Probenkollektiv P, Generation 2.

Parameter	PK	Minim.	Maxim.	arith. M.	Parameter	PK	Minim.	Maxim.	arith. M.
Länge des Mauersteins in cm	K	11	42	23,9	Grad der Entwicklung von sparitverheilten Rissen	K	1	4	1,8
	S	13	28	20,6		S	1	4	2,5
	P1	21	46	36,3		P1	1	4	2,8
	P2	14	46	30,2		P2	1	4	2,3
	E	9	83	28,9		E	1	3	1,8
Höhe des Mauersteins in cm	K	4	19	11,1	Grad der Entwicklung von Stylolithen	K	1	4	2,7
	S	8	18	12,8		S	1	3	1,8
	P1	15	36	20,5		P1	1	3	1,6
	P2	14	21	16,8		P2	1	2	1,5
	E	4	25	12,9		E	1	4	2,6
Tiefe des Mauersteins in cm	K	10	30	18,2	Trockenrohdichte in g/cm ³	K	2,4919	2,7297	2,6366
	S	13	36	22,1		S	2,4909	2,7926	2,6420
	P1	18	39	27,5		P1	2,6204	2,7263	2,6971
	P2	12	26	17,4		P2	2,6981	2,7101	2,7038
	E	11	37	24,4		E	2,5770	2,7430	2,6783
Dimensions-Index	K	0,0201	0,2750	0,0920	freiwillige Wasser- aufnahme in Vol.-%	K	0,10	6,83	1,78
	S	0,0432	0,1538	0,0911		S	0,82	5,52	1,93
	P1	0,0180	0,1000	0,0433		P1	0,28	1,24	0,55
	P2	0,0216	0,0590	0,0379		P2	0,20	0,59	0,43
	E	0,0090	0,2220	0,0898		E	0,43	3,43	1,46
Grad der Oberflächenschädigung	K	2	3	2,3	effektive Porosität in Vol.-%	K	0,26	7,31	2,42
	S	2	3	2,4		S	1,10	8,00	2,53
	P1	2	2	2		P1	0,31	1,46	0,60
	P2	2	2	2		P2	0,21	0,67	0,46
	E	2	3	2,3		E	0,57	4,25	1,87
Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes	K	2	4	2,5	Schurecht-Ratio	K	0,259	0,965	0,703
	S	2	5	2,9		S	0,566	0,965	0,781
	P1	2	5	2,9		P1	0,701	0,991	0,909
	P2	2	3	2,2		P2	0,739	0,985	0,918
	E	2	5	2,9		E	0,640	0,943	0,784
Grad der Schädigung bei der Präparation	K	1	4	1,7	salzsäureunlöslicher Rückstand in Gew.-%	K	6,90	20,99	14,46
	S	1	4	1,9		S	1,85	7,81	3,38
	P1	1	4	2,1		P1	1,73	7,02	3,26
	P2	1	2	1,3		P2	0,76	2,26	1,60
	E	1	4	1,9		E	1,24	6,91	2,78
Gefüge-Index	K	2	16	4,5	Kalzium-Gehalt in Gew.-%	K	30,5	35,4	33,1
	S	2	20	6,2		S	32,9	38,7	37,2
	P1	2	15	6,5	Magnesium-Gehalt in Gew.-%	K	0,24	2,54	0,44
	P2	2	4	2,8		S	0,62	2,75	1,23
	E	2	12	5,6	Eisen-Gehalt in Gew.-%	K	0,146	1,523	0,612
korrigierter Gefüge-Index	K	2,40	16,42	5,66		S	0,215	0,470	0,309
	S	2,63	21,37	7,51	Natrium-Gehalt in mg/kg Gestein	K	909	2475	1832,8
	P1	2,76	16,03	7,59		S	882	3015	1814,3
	P2	3,10	5,34	4,22	Kalium-Gehalt in mg/kg Gestein	K	113	1053	534,6
	E	2,73	13,61	7,16		S	133	578	332,6
dynamischer Elastizitäts- Modul parallel zur Schich- tung in GPa (= GN/m ²)	K	44,44	109,81	84,68	Strontium-Gehalt in mg/kg Gestein	K	258	725	518,7
	S	46,35	114,48	79,36		S	178	255	224,6
dynamischer Elastizitäts- Modul senkrecht z. Schich- tung in GPa (= GN/m ²)	K	14,62	106,51	61,62	Barium-Gehalt in mg/kg Gestein	K	6,1	26,4	11,9
	S	31,02	112,59	67,85		S	18,2	423,8	103,8
					Aluminium-Gehalt in mg/kg Gestein	K	164	1644	750,1
						S	234	820	443,6
					Mangan-Gehalt in mg/kg Gestein	K	180	367	235,2
						S	160	233	191,1

sammenhalt und Grad der Schädigung bei der Präparation als auch die einer additiven Verknüpfung. Im weiteren wird die multiplikative Verknüpfung angewandt, da sie m. E. dem Umstand, daß beide Parameter nicht direkt miteinander vergleichbar sind, mehr entgegenkommt. Deshalb lautet in dieser Arbeit die Formel für den Gefüge-Index:

Gefüge-Index = Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes x Schädigung bei der Präparation

Obwohl im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur die Ergebnisse unter Verwendung dieser Formel dargestellt werden, sind parallel dazu die wichtigsten Berechnungen und Korrelationen unter Verwendung eines additiv errechneten Gefüge-Indexes erstellt worden. Da sie sich in ihren Ergebnissen nie nennenswert von den hier dargestellten unterscheiden, wird nicht weiter darauf eingegangen.

In einem Probenkollektiv aus einem Bauwerk kann der Gefüge-Index nie kleiner als 2 sein, da dort der geringstmögliche Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes 2 und der geringstmögliche Grad der Schädigung bei der Präparation 1 beträgt. Je größer der Gefüge-Index ist, desto stärker ist der innere Zusammenhalt des Mauersteins geschädigt.

Da in den meisten früheren Untersuchungen das Hauptaugenmerk auf die Oberflächenschäden gerichtet war, interessiert hier die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Gefüge-Index und dem Grad der Oberflächenschädigung gibt. Dabei muß man allerdings berücksichtigen, daß der Grad der Oberflächenschädigung in den Probenkollektiven K, S und E nur eine geringe Schwankungsbreite (zwischen 2 und 3) zeigt. Trotzdem zeigt Abb. 4 eine erkennbare Korrelation: Mit zunehmendem Gefüge-Index nimmt der Grad der Oberflächenschädigung in den Probenkollektiven K und S tendenziell zu. Für das Probenkollektiv P ist eine vergleichbare Darstellung nicht möglich, da in allen Fällen die Oberfläche nur leicht angewittert (Grad der Oberflächenschädigung = 2) war. Im Probenkollektiv E ist eine Korrelation zwischen dem Gefüge-Index und dem Grad der Oberflächenschädigung nicht erkennbar - möglicherweise war die Expositionsdauer nicht lang genug, um eine Ausprägung dieser Korrelation zu erlauben.

4.1.2. Zusammenhänge zwischen Gefüge-Index und Dimensions-Index des Mauersteins

Viel wichtiger sind natürlich die Zusammenhänge zwischen dem Gefüge-Index und anderen Gesteinsparametern. Im Rahmen der statistischen Auswertung stellte sich aber meist heraus, daß eine Korrelation nur ± undeutlich erkennbar ist. Bei der Suche nach dem Grund dafür wurde eine unerwartete, aber sehr auffällige Korrelation beobachtet: Es bestehen zwischen dem Gefüge-Index und der Länge, Tiefe und Höhe des Mauersteins enge Zusammenhänge. Um diese Zusammenhänge zu erfassen, war die Definition eines Dimensions-Index notwendig, in dem die Dimensionen des Mauersteins zueinander in Beziehung gesetzt werden. An den Daten der Probenkollektive K, S, P und E wurden zahlreiche, z. T. sehr unterschiedliche Formeln erprobt. Dabei stellte sich heraus, daß die einfachste Formel die beste Korrelation zeigte - gleichgültig, ob der Gefüge-Index wie überall in dieser Arbeit multiplikativ oder stattdessen additiv gebildet wurde. Die Formel lautet:

$$\text{Dimensions-Index} = \frac{\text{Tiefe (cm)}}{\text{Höhe (cm)} \times \text{Länge (cm)}}$$

Die in Abb. 6 anhand des Probenkollektivs K dargestellten, aber auch in den anderen Probenkollektiven (Abb. 7-9) nachweisbaren Beziehungen zwischen Dimensions-Index und Gefüge-Index lassen nur folgende Deutung zu: Der Verwitterungszustand eines Mauersteins - gemessen als Gefüge-Index ist in einem großen Umfang vom Verhältnis der Größe der Außenseite des Mauersteins - gemessen als das Produkt aus Länge und Höhe des Mauersteins - zur Tiefe des Mauersteins abhängig. Je kleiner die Außenseite und je größer die Tiefe ist (= Dimensions-Index groß), desto geringer ist die Gefahr einer Schädigung des Gesteins. Umgekehrt ist die Gefahr einer Schädigung des Gesteins größer, wenn die Außenseite größer und die Tiefe geringer ist (= Dimensions-Index klein). Wie das Diagramm zeigt, trifft das aber nicht alle Mauersteine gleichermaßen, denn innerhalb der gesamten Spannweite des Dimensions-Indexes finden sich Steine ohne erkennbare Schädigung (Gefüge-Index = 2). Dafür nimmt aber mit abnehmendem Dimensions-Index die Anzahl und die Schwere der Schäden kontinuierlich zu. Mauersteine mit kleinem Dimensions-Index werden also stärker beansprucht als solche mit großem Dimensions-Index, so daß bei einem kleinen Dimensions-Index nur Mauersteine aus besonders verwitterungsbeständigem Gestein ungeschädigt bleiben, während bei ei-

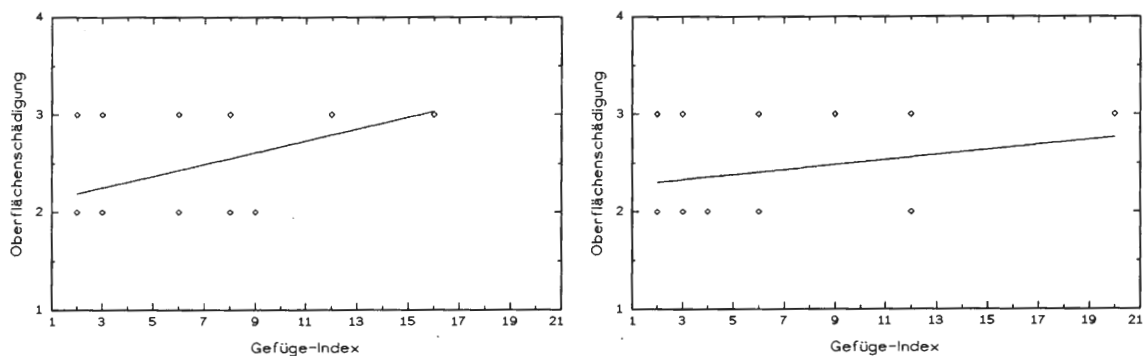


Abb. 4: Diagramme der Korrelation zwischen dem Gefüge-Index und dem Grad der Oberflächenschädigung. Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S. Die im Diagramm dargestellten Punkte sind z. T. von mehreren Mauersteinen gleichzeitig besetzt.

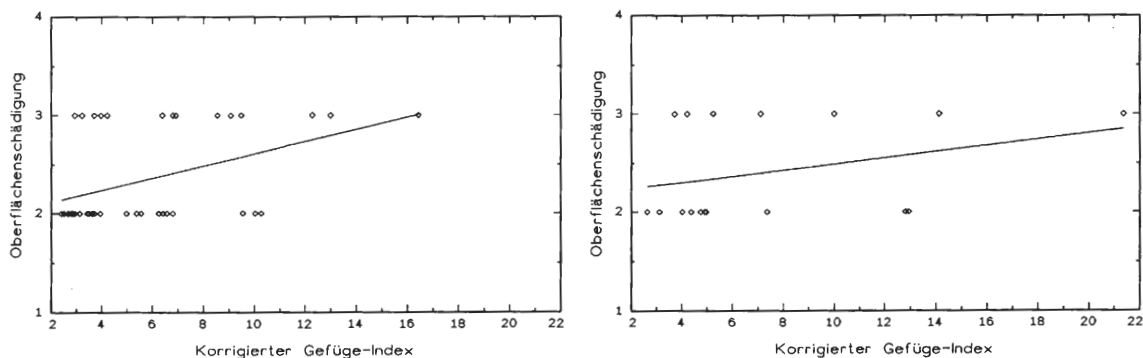


Abb. 5: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Grad der Oberflächenschädigung. Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S. Das Gesamtbild entspricht dem von Abb. 4, aber die einzelnen Mauersteine sind unterscheidbar.

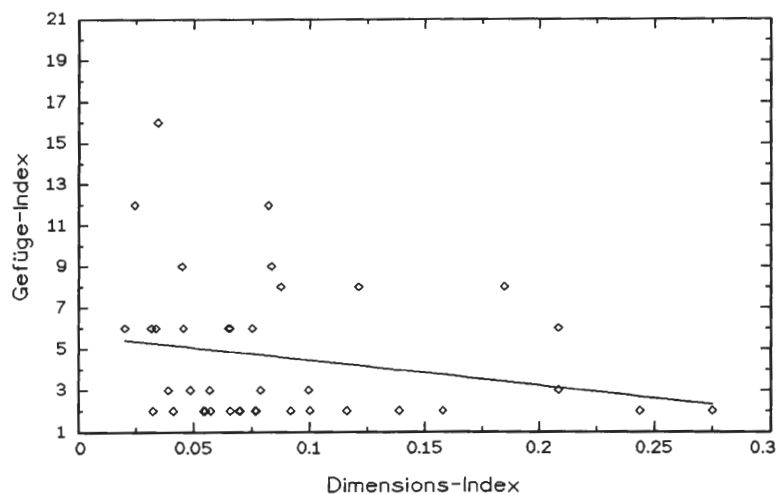


Abb. 6: Diagramm der Korrelation zwischen dem Gefüge-Index und dem Dimensions-Index. Probenkollektiv K.

nem großen Dimensions-Index auch Mauersteine aus wenig verwitterungsbeständigem Material ohne Schäden bleiben.

Der Vergleich des Probenkollektivs K (und der Probenkollektive S und E) mit den beiden Mauerstein-Generationen des Probenkollektivs P (Abb. 8) zeigt, daß

- die diskutierten Beziehungen zwischen Dimensions-Index und Gefüge-Index bei sehr unterschiedlichen Kalksteinen auftreten. Es ist deshalb anzunehmen, daß diese Korrelation in gleicher oder ähnlicher Weise für alle Kalksteine gilt.
- sich diese Beziehungen nicht nur bei ziemlich kleinen Mauersteinen (wie im Probenkollektiv K), sondern auch bei großen Mauersteinen (wie im Probenkollektiv P) bemerkbar machen (vgl. Tabelle 1). Allerdings ist es möglich, daß sich dieses Phänomen mit zunehmender Größe der Mauersteine weniger stark ausprägt; denn im Probenkollektiv K tritt die diskutierte Korrelation zwischen Dimensions-Index und Gefüge-Index deutlicher als in den Probenkollektiven S und E und noch deutlicher als im Probenkollektiv P in Erscheinung.
- die im Gefüge-Index dokumentierte Schädigung nicht „über Nacht“ entsteht, sondern sich langsam im Laufe der Zeit entwickelt (vgl. die beiden Generationen des Probenkollektivs P). Aber schon in den wenig geschädigten Mauersteinen der Generation 2 des Probenkollektivs P ist die Korrelation mit dem Dimensions-Index erkennbar (siehe Abb. 8).

Die oben dargestellten Beziehungen zwischen den Maßen eines Mauersteins (hier erfaßt im Dimensions-Index) und seinem Verwitterungszustand (hier klassifiziert im Gefüge-Index) werden in der vorliegenden Literatur nirgendwo beschrieben oder diskutiert, obwohl sie wichtige Konsequenzen für wissenschaftliche Untersuchungen nach sich ziehen:

- Die im Kapitel 2.2. geäußerte Arbeitshypothese, daß bei einem Probenkollektiv, das von einem Standort entnommen wird, der die dort aufgelisteten Forderungen erfüllt, sämtliche Unterschiede im Verwitterungszustand der Mauersteine auf spezifischen Unterschieden in primären Parametern des Gesteins beruhen, ist so nicht haltbar. Länge, Tiefe und Höhe eines Mauersteins beeinflussen seine Verwitterung erheblich.
- Bisher war es bei Untersuchungen über die Verwitterung von Bausteinen nicht üblich, die Dimensionen der Steine zu erfassen. Die vorliegenden Daten zeigen aber, daß ihre Nichtberücksichtigung zu gravierenden Verfälschungen der Ergebnisse führen kann. Darauf muß die weitere statistische Auswertung Rücksicht nehmen.

Das oben beschriebene Phänomen hat aber auch wichtige Konsequenzen für die Praxis des Bauens und Renovierens:

- Wenn bei einem zu restaurierenden oder renovierenden Gebäude schadhaftes Gestein ersetzt werden muß, ist man bestrebt, möglichst wenig in die Tiefe zu gehen, um die Kosten und den Verlust an Originalsubstanz möglichst klein zu halten. Diese Vorgehensweise ist nach den oben geschilderten Beobachtungen als sehr problematisch zu bewerten, denn je weniger weit man in die Tiefe geht, desto geringer ist die Tiefe der Ersatzsteine und desto kleiner ist ihr Dimensions-Index. Das gefährdet aber die Verwitterungsbeständigkeit der Ersatzsteine. So fordert DOLL (1978b: 372), daß die Ersatzsteine mindestens 15-20 mm Dicke (= Tiefe) haben sollen, damit sie nicht beim Einbau brechen. Die hier dargelegten Beobachtungen lassen aber einen zehnmal größeren Grenzwert als notwendig erscheinen.
- Wenn man weniger verwitterungsbeständige Typen eines Kalksteins verbauen will, muß man darauf achten, daß der Dimensions-Index der Mauersteine möglichst groß ist.

Welche Erklärungen lassen sich für die beobachtete Abhängigkeit zwischen Dimensions-Index und Gefüge-Index geben? Man muß davon ausgehen, daß die sich im Gefüge-Index niederschlagenden Schädigungen des Steins auf Witterungseinflüssen - insbesondere auf Schwankungen der Temperatur und des Wassergehaltes - beruhen. Diese Schwankungen sind auf der Außenseite des Mauersteins am größten und nehmen nach innen immer mehr ab, da das Innere der Mauer ein erheblich ausgeglicheneres „Mauerwerksklima“ hat, was z. B. die Simulationsversuche von SCHWARZ et al. (1991a) und die Untersuchungen an verschiedenen Beton-Typen von KÜNZEL (1990a: Abb. 1; 1990b: Abb. 10) dokumentieren. In diesem Zusammenhang ist wichtig, daß Gesteine eine $\pm$ geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen - z. B. nimmt eine insulationsbedingt erhöhte Temperatur von der Außenschicht zum Inneren des Gesteins schnell ab (SCHÄFER 1990: 732). Daraus resultiert, daß ein Mauerstein mit kleinem Dimensions-Index stärker beansprucht wird und stärkere Verwitterungsschäden zeigt als ein Mauerstein mit großem Dimensions-Index. Ein Mauerstein mit kleinem Dimensions-Index hat eine verhältnismäßig große Außenseite, die der Witterung ausgesetzt ist, und ein verhältnismäßig großer Teil seines Volumens befindet sich im äußeren Bereich der Mauer mit stärkeren Feuchte- und Temperatur-Schwankungen.

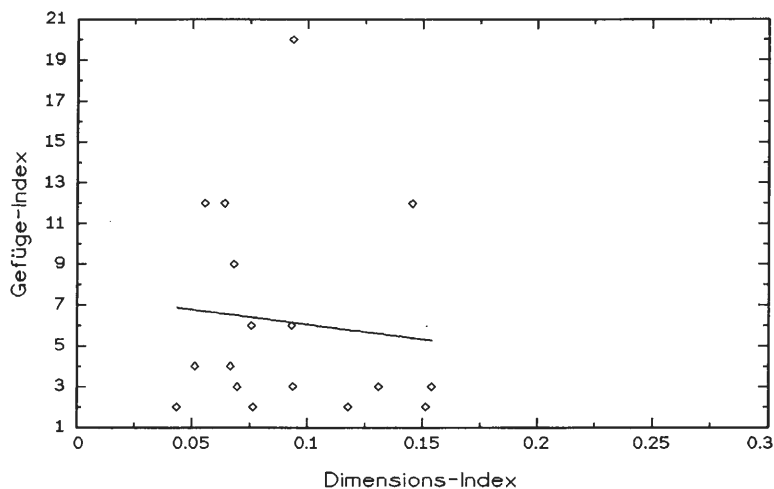


Abb. 7: Diagramm der Korrelation zwischen dem Gefüge-Index und dem Dimensions-Index. Probenkollektiv S.

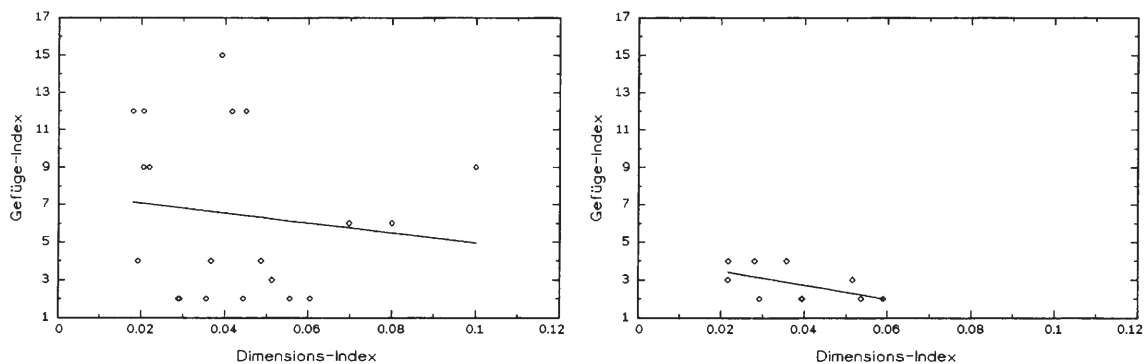


Abb. 8: Diagramme der Korrelation zwischen dem Gefüge-Index und dem Dimensions-Index. Probenkollektiv P. Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1; Expositionsdauer 143 Jahre), rechts nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2; Expositionsdauer 29 Jahre).

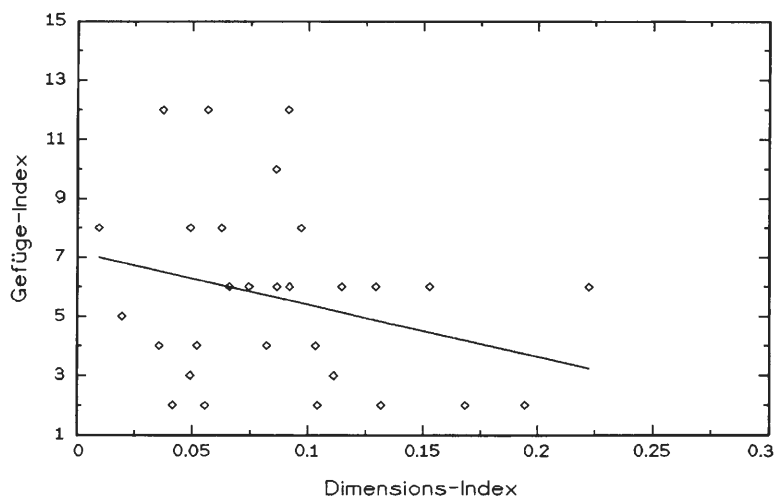


Abb. 9: Diagramm der Korrelation zwischen dem Gefüge-Index und dem Dimensions-Index. Probenkollektiv E.

Nun könnte man aus diesen Überlegungen den Schluß ziehen, daß Steine, die insgesamt kleiner sind, leichter geschädigt werden als größere (bei gleichem Dimensions-Index), da sie nicht so weit in den klimatisch ausgeglicheneren Teil des Mauerwerks reichen. Dem steht aber die Feststellung von LITVAN (1980: 456) gegenüber, daß die Frostbeständigkeit eines Festkörpers (ein wichtiger Aspekt der Verwitterungsbeständigkeit) mit abnehmender Größe des Festkörpers zunimmt. Die hier beobachteten Verhältnisse sind allerdings nicht so einfach, denn meine Untersuchungen zeigen, daß die im Gefüge-Index ausgedrückten Verwitterungsschäden nicht direkt von der Größe des Mauersteins abhängen. Möglicherweise neutralisieren sich die beiden antagonistischen Effekte. Zwar zeigen alle untersuchten Probenkollektive eine sehr schwache positive Korrelation zwischen der Größe der Mauersteine und dem Gefüge-Index, aber die Steigung der Geraden ist so gering und die Streuung der Meßwerte so groß, daß keine Rechtfertigung zur Annahme einer ausgeprägten Korrelation besteht. Die bisherigen Untersuchungen liefern keinen Hinweis darauf, daß der von BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988a: 77) angeführte Effekt, daß kleinere Steine verwitterungsbeständiger seien als größere Steine aus dem gleichen Material, für das hier vorliegende Material nennenswerte Bedeutung besitzt.

An dieser Stelle müssen noch zwei wichtige offene Fragen genannt werden, die sich bei der Betrachtung der Korrelation zwischen dem Gefüge-Index und dem Dimensions-Index stellen:

- Treten vergleichbare Korrelationen auch an andersartigen Gesteinen (Sandsteine oder Magmatite) auf? Die Beantwortung dieser Frage sprengt natürlich den Rahmen dieses Forschungsprojektes. Trotzdem sollte man mit vergleichbaren Phänomenen bei anderen Gesteinen rechnen, auch wenn sie dort noch nicht untersucht wurden. So beschreiben z. B. CANER & TÜRKMEENOGLU (1985) die Verwitterung eines Basaltes, die hauptsächlich durch Rißbildung und Zerfall in Stücke erfolgt. Leider untersuchten CANER & TÜRKMEENOGLU (1985) nicht, ob die Verwitterungsintensität durch Form oder Größe der Steine beeinflußt wurde. PENKALA & BRALEWSKA (1976: 221-222) beschreiben eine vergleichbare Rißbildung in feinkörnigem Sandstein, die sie auf die Aktivität von Wasser und Frost zurückführen.
- Wie läßt sich die Korrelation zwischen Gefüge-Index und Dimensions-Index eliminieren? Sie ist für meine Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen Gesteinsparametern und Verwitterungszustand äußerst störend.

4.1.3. Korrigierter Gefüge-Index

Die letzte Frage mag auf den ersten Blick ungewöhnlich wirken, man muß sich aber bewußt werden, daß die einzige Möglichkeit, den Einfluß des Dimensions-Index - ohne mathematische Korrekturen - zu eliminieren, darin besteht, nur Mauersteine mit demselben Dimensions-Index auszuwerten. Das ist aber praktisch nicht möglich, da es schon jetzt sehr schwierig ist, für die statistische Auswertung genügend große Probenkollektive zu erhalten. Außerdem kommt es häufiger vor, daß zwei verschiedene Proben in einem Diagramm mit dem Gefüge-Index dieselbe Stelle besetzen (was sich im Diagramm nicht erkennen läßt). Beide Punkte sprechen dafür, den Gefüge-Index mathematisch zu korrigieren. Da aber bisher keine vergleichbaren Untersuchungen erfolgt sind, konnte der Verfasser auch nirgendwo einen Vorschlag zur mathematischen Korrektur finden.

Lösungsansätze ergeben sich aus einer genauen Betrachtung von Abb. 6-9, denn in diesen Abbildungen wurde auch die Regressionsgerade eingetragen. Sie zeigt den Verwitterungszustand (als Gefüge-Index) eines Mauersteins mit durchschnittlicher Gesteinsausbildung beim jeweiligen Dimensions-Index an. Wichtig ist die Steigung der Regressionsgeraden des Korrelationsdiagramms mit der X-Achse Dimensions-Index und der Y-Achse Gefüge-Index. Das linke obere Ende der Regressionsgeraden hat die Koordinaten X_1, Y_1 und das rechte untere Ende die Koordinaten X_2, Y_2 . Da die Korrelationsdiagramme mit dem Programm Tech-Plot erstellt wurden, lassen sich die genauen Daten für X_1, Y_1 und X_2, Y_2 der entsprechenden Datei entnehmen. Daraus ergeben sich folgende Ansätze:

- Eine Lösungsmöglichkeit ist die Normierung des Gefüge-Indexes auf die Regressionsgerade. Diese in anderen Disziplinen (z. B. der Physik) angewandte Methode führt zu folgender Formel:

$$\text{Normierter Gefüge-Index} = \frac{\text{Gefüge-Index} - Y_1}{Y_2 - Y_1} \times \frac{X_2 - X_1}{\text{Dimensions-Index} - X_1}$$

Der normierte Gefüge-Index hat nicht nur die Eigenschaft, daß die Regressionsgerade horizontal liegt, sondern auch, daß bei großem Dimensions-Index (rechter Teil der Diagramme Abb. 6-9) die gemessenen geringen Unterschiede im Gefüge-Index in relativ große Unterschiede im normierten Gefüge-Index umgerechnet werden. Da aber Proben mit großem Dimensions-Index nur wenig Aussagen zur Verwitterungsbeständigkeit zulassen, besteht die Gefahr von Verfälschungen durch diese Methode.

- Eine Alternative besteht darin, daß man die Regressionsgerade - und gleichzeitig alle Probenwerte - so rotiert, daß die Regressionsgerade im Diagramm genau horizontal liegt, die Unterschiede in der Größe des Gefüge-Indexes aber nicht verändert werden. Jetzt nämlich hat ein Mauerstein mit durchschnittlicher Gesteinsausbildung überall denselben korrigierten Gefüge-Index, aber die Unterschiede in den Proben mit großem Dimensions-Index werden nicht überbetont.

Im Rahmen der statistischen Auswertungen wurden die wichtigsten Korrelationen sowohl mit einem normierten, als auch mit einem korrigierten Gefüge-Index errechnet. Es ließen sich in den Ergebnissen keine nennenswerten Unterschiede feststellen. Beide erfüllen auch neben einem Ausgleich der im Dimensions-Index ausgedrückten Unterschiede zwischen den Mauersteinen den erhofften Vorteil bei der graphischen Darstellung: Es ist sehr unwahrscheinlich, daß zwei verschiedene Proben in einem Diagramm mit dem normierten/korrigierten Gefüge-Index dieselbe Stelle besetzen. Ein Beispiel sind die Korrelationsdiagramme mit dem Grad der Oberflächenschädigung (Abb. 5). Aufgrund der Behandlung von Proben mit großem Dimensions-Index und der sehr einfachen und anschaulichen allgemeinen Formel für den korrigierten Gefüge-Index, wird im weiteren nur noch mit dem korrigierten Gefüge-Index gearbeitet. Seine Formel lautet:

$$\text{Korrigierter Gefüge-Index} = \text{Gefüge-Index} + (\text{Dimensions-Index} \times \frac{Y_1 - Y_2}{X_2 - X_1})$$

Nur im rechten Formelteil ($\frac{Y_1 - Y_2}{X_2 - X_1}$) werden die Besonderheiten eines bestimmten Probenkollektivs berücksichtigt; deshalb muß der rechte Formelteil ($\frac{Y_1 - Y_2}{X_2 - X_1}$) für jedes Probenkollektiv neu berechnet werden. Der Zahlenwert von ($\frac{Y_1 - Y_2}{X_2 - X_1}$) beträgt beim Probenkollektiv K 12,21365, beim Probenkollektiv S 14,62152 und beim Probenkollektiv E 17,62441. Bei den Mauersteinen der Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine) des Probenkollektivs P beträgt dieser Zahlenwert 26,35864 und bei der Generation 2 (= nachträglich eingebaute Mauersteine) 37,39064.

Durch die Einführung des korrigierten Gefüge-Indexes ist zwar ein erheblicher Fortschritt erreicht, aber die Proben mit großem Dimensions-Index stellen immer noch einen Störfaktor dar, da unter ihnen sowohl sehr verwitterungsbeständige als auch wenig verwitterungsbeständige Gesteine einen vergleichbar niedrigen Gefüge-Index erhalten. Eine deutliche Differenzierung der Gesteine tritt ja erst bei einem kleinen Dimensions-Index auf. Die einzige mögliche Abhilfe besteht darin, den Teil des Probenkollektivs mit großem Dimensions-Index aus der statistischen Auswertung auszuschließen. Das ist aber nur sinnvoll, wenn das gesamte Probenkollektiv umfangreich genug ist. Beim Probenkollektiv S z. B. ist dieses Vorgehen nicht möglich. Beim Probenkollektiv K wurde parallel zur gesamten Probenmenge zusätzlich der Teil mit einem Dimensions-Index kleiner als 0,15 statistisch ausgewertet. Meist ergaben sich keine nennenswerten Unterschiede im Vergleich zum gesamten Probenkollektiv; deshalb werden nur in einzelnen Diagrammen dieser Arbeit Proben mit einem Dimensions-Index kleiner als 0,15 gesondert dargestellt. Der Grenzwert von 0,15 wurde beim Dimensions-Index willkürlich gewählt.

4.2. Ergebnisse der Dünnschliff-Untersuchungen

4.2.1. Mikrofaziestypen

Der wichtigste und für die Fragestellung dieser Arbeit ergiebigste Abschnitt der Untersuchungen an den Dünnschliffen ist die Unterscheidung und Charakterisierung verschiedener Mikrofaziestypen. Da hier nicht Standardmikrofaziestypen übernommen wurden, sondern die Mikrofaziestypen anhand des vorliegenden Materials definiert und abgegrenzt wurden, um auf die besonderen Entstehungs- und Diagenese-Bedingungen jeder Gesteinsschicht eingehen zu können, sind durchaus deutliche Unterschiede zu anderen

Mikrofazies-Klassifikationen für diese Schichten möglich. Außerdem dürfen die hier unterschiedenen Mikrofaziestypen nicht ungeprüft auf andere Gesteinsschichten übertragen werden.

Die Mikrofazies-Analyse erfolgt für verschiedene Gesteinsschichten getrennt, wie im Kapitel 2.5. erläutert wird. Die Mikrofaziestypen 1-4 stammen aus dem Trochitenkalk (unterer Teil der Trochitenkalk-Formation des Oberen Muschelkalks), die Mikrofaziestypen 5-10 aus dem Osnabrücker Wellenkalk (Wellenkalk-Formation des Unteren Muschelkalks), die Mikrofaziestypen 11-14 aus dem Beisinghäuser Kalk des Devons und die Mikrofaziestypen 15-17 aus dem Terebratelkalk (oberster Teil der Trochitenkalk-Formation des Oberen Muschelkalks).

Die Identifizierung bestimmter Schalentypen bei Muscheln und Brachiopoden im Muschelkalk-Material erfolgte anhand der Ausführungen von BACHMANN (1973: 24-29), BRUCKSCHEN (1992: 30-35) und SCHWENKE (1993: 111-127). Beschreibungen, Abbildungen und Verweise auf weiterführende Literatur bezüglich der im Beisinghäuser Kalk gefundenen Mikrofossilien finden sich insbesondere in den Arbeiten von FLÜGEL & HÖTZL (1971), NEUMANN, POZARYSKA & VACHARD (1975), VACHARD (1988, 1993), MAY (1992), RACKI & SOBON-PODGÓRSKA (1993) und FLÜGEL (1982; insbesondere Taf. 26), darüberhinaus auch in den Publikationen von TOOMEY et al. (1970), RIDING & JANSÁ (1974, 1976), MAMET & ROUX (1975, 1983), MAMET & PREAT (1987), LOEBLICH & TAPPAN (1988) und MAMET & ROUX et al. (1992). Eine ausführliche Darstellung der Mikrofauna und -flora des Beisinghäuser Kalkes liefert MAY (1994a, e).

Mikrofaziestyp 1 (Tafel 4, Fig. 1)

FOLK-Klassifikation: Crinoiden-Biomikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Crinoiden-Floatstone bis -Packstone.

Kurzbeschreibung: Bis zu 10 mm große, dicht gepackte, oft abgerollte oder zerbrochene Crinoiden-Stielglieder (= Trochiten) liegen in einer mikritischen Matrix. Ca. 50-60 % des Dünnschliffs nehmen Trochiten ein. Schalenreste sind selten, Ooide fehlen fast völlig.

Beschreibung: Es handelt sich um Floatstones, die hauptsächlich aus dicht gepackten Crinoiden-Stielgliedern (= Trochiten) bestehen. Trochiten umfassen ca. 50-60 % der Fläche des Dünnschliffs. Die Trochiten sind oft abgerollt, zerbrochen oder fragmentiert und haben bis zu 10 mm Länge. Trotzdem ist davon auszugehen, daß ein Großteil der Trochiten nicht weit transportiert wurde, da sich vereinzelt auch größere zusammenhängende Skelett-Teile von Crinoiden fanden.

Die Trochiten zeigen keine Mikritrinden, sind aber gelegentlich bis häufig und stark von gangförmigen Spuren angebohrt. Die Bohrspuren lassen sich zu einem großen Teil *Talpina gruberi* MAYER 1952 zuordnen; daneben treten aber auch größere, *Calciroda*-artige Bohrgänge auf (siehe: GRUBER 1933; MAYER 1952). Schalenreste sind selten. Sehr selten treten Ooide von 0,8 mm Durchmesser auf. Die Matrix besteht aus Mikrit, der stellenweise einen Aufbau aus Peloiden sowie Fragmente von „Algenschläuchen“ (siehe Mikrofaziestyp 3) zeigt.

Die mikritische Matrix besteht aus Fe-I-Kalzit und ist in wechselndem Umfang dolomitisiert (stellenweise bis fast vollständig). Die dolomitisierten Bereiche setzen sich aus 0,03-0,3 mm großen Dolomitkristalle zusammen, die stellenweise Spuren von Dedolomitisierung (= Umwandlung von Dolomit in Kalzit) zeigen (siehe auch Mikrofaziestyp 3). Die Dolomitisierung ist (anfangs) flecken- bis wolkenartig und geht von der Matrix aus. Trochiten sind bestenfalls randlich betroffen. Die Trochiten werden aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit aufgebaut, können aber in der Nähe zu dolomitisierter Matrix - an der Peripherie oder am Zentralkanal - aus Fe-II-Kalzit bestehen.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Gut vergleichbar mit dem Mikrofaziestyp 1 sind die von LUKAS (1991: 132-133, Taf. 2 Fig. 3-4) aus dem Unteren (!) Muschelkalk Hessens beschriebenen „Trochiten Packstones-Floatstones“. Erwähnenswert ist nur, daß im Material aus dem Trochitenkalk Bielefelds noch keine Hartgründe oder Intraklasten beobachtet wurden, was aber daran liegen kann, daß nur einzelne Mauersteine und keine größeren Aufschlüsse untersucht werden konnten. Dem Mikrofaziestyp 1 entsprechende Gesteine beschreibt AIGNER (1985: 69-72, Abb. 33) aus dem Oberen Muschelkalk Süddeutschlands unter dem Namen „massive crinoidal limestone“. Das in dieser Arbeit als Mikrofaziestyp 1 bezeichnete Gestein läßt sich am besten dem Standardmikrofaziestyp 12 von WILSON (1975: 65, Taf. 21 B) zuordnen.

Sedimentäres Environment und Genese: Crinoiden sind stenohalin. Sie belegen ein $\pm$ vollmarines Milieu. Der Hauptlebensraum des den Trochitenkalk aufbauenden Crinoiden *Encrinurus* lag im flachen Subtidal unterhalb der Schönwetter-Wellenbasis (HESSE 1991: 28-29; LUKAS 1991: 133; vgl.

HAGDORN 1978). Obwohl die zahlreichen Bohrspuren ganz allgemein auf flaches Wasser verweisen, läßt das ziemlich häufige Auftreten von *Talpina gruberi* MAYER 1952 keine Aussagen zur Wassertiefe zu, da diese Bohrspur von SCHMIDT (1992: 57, 127; 1993: 272) als bathymetrischer Durchläufer erkannt wurde. LUKAS (1991: 133) folgend kann man das sedimentäre Environment des Mikrofaziestyps 1 im flachmarinen Bereich zwischen Sturm-Wellenbasis und Schönwetter-Wellenbasis verorten, wie es die zahlreichen, z. T. nicht weit transportierten Crinoiden-Reste und die mikritische Matrix belegen. Das Auftreten der auf den euphotischen Bereich verweisenden „Algenschläuche“ unterstützt diese Einordnung.

Die Entstehung einer mikritischen Matrix durch die Kompaktion von Peloiden, wie sie bei den Mikrofaziestypen 1-3 und 16 auftritt, wurde in vergleichbarer Weise von BACHMANN (1973: 14-16, Abb. 4) aus dem Oberen Muschelkalk von Südwest-Deutschland als „krümelige Struktur“ beschrieben. Ebenso wie er bin ich der Ansicht, daß die „krümelige Struktur“ primär durch Ablagerung und nicht sekundär durch Umkristallisation (von Mikrit zu Sparit) entstand. BACHMANNs (1973: 15) Liste von Argumenten dafür sei hier noch folgendes zugefügt: Wenn man von einer diagenetischen Umkristallisation einer ($\pm$ homogenen) Mikrit-Matrix ausgeht, wie soll man dann erklären, daß nur bestimmte Stellen rekristallisierten, während benachbarte mikritische Strukturen – wie z. B. Mikritrinden und „Algenschläuche“ – unverändert blieben?

Die Dolomitisierung muß spätdiagenetisch erfolgt sein, denn

- die Dolomitekristalle sind verhältnismäßig groß;
- die Dolomitisierung wirkt strukturzerstörend;
- die Dolomitisierung ist wechselnd stark und beginnt flecken- bis wolkenartig.

Von einer spätdiagenetischen Zeitlichkeit der Dolomitisierung im Trochitenkalk gehen auch SKUPIN (1970: 32) und BACHMANN (1973: 51) aus.

Die beginnende Dedolomitisierung ist im Zusammenhang mit Verwitterungsprozessen an der Erdoberfläche zu sehen (vgl. BRUCKSCHEN 1992: 53-54).

V o r k o m m e n : Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Vermutlich handelt es sich um den obersten Teil des Trochitenkalks, denn DUCHROW & GROETZNER (1984: 181) schreiben: „Die für den Trochitenkalk namengebenden und anderenorts massenhaft vorkommenden Stielglieder der Seelilie *Encrinurus liliiformis* treten im Osnabrücker Raum stark zurück. Ihr Anteil am Gestein bleibt fast immer unter 10%. In vielen Profilen tritt jedoch an der Oberkante des HT eine trochitenreiche Bank auf, die stellenweise mehr als 30% schlecht sortierte Crinoiden-Reste führt...“ Vergleichbare Beobachtungen machten MESTWERDT & BURRE (1981: 6) bei der Kartierung des MTB Bielefeld durch die Preußische Geologische Landesanstalt: „In den tieferen Lagen [des Trochitenkalks], die zum Teil oolithisch sind, sind die Trochiten nicht so massenhaft vertreten, wie in den höheren... Nach oben bildet dann meist eine etwa 0,25 m starke Trochitenkalkebank den Abschluß.“ Die Untersuchungen von SCHWENKE (1993: 60) zeigen, daß diese Entwicklung für das gesamte Osning-Egge-Gebiet gilt. Ebenso zeigte die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgte Aufschlußaufnahme bei Helpup (siehe Kap. 3.4.2.), daß im obersten Teil des Trochitenkalks auffällig trochitenreiche Kalke auftreten. Aber auch RÖHL (1986: 495) weist darauf hin, daß im Hildesheimer Wald relativ trochitenreiche Kalke vor allem am Top des Trochitenkalkes erscheinen.

Mikrofaziestyp 2

(Tafel 4, Fig. 2)

F O L K - K l a s s i f i k a t i o n : Schlecht ausgewaschener, ooidführender Biosparit.

D U N H A M - K l a s s i f i k a t i o n : Schlecht ausgewaschener Rud- bis Grainstone aus Schalen und Ooiden.

K u r z b e s c h r e i b u n g : Schalenreste (ca. 30-40 % des Dünnschliffs) und Ooide (5-15 % des Dünnschliffs) sind die wichtigsten Partikel, während Pelioide (ca. 10 % des Dünnschliffs) und Crinoidenreste (ca. 5 % des Dünnschliffs) nur eine untergeordnete Rolle spielen. In den Zwickelräumen dominiert sparitischer Zement, Mikrit ist untergeordnet.

B e s c h r e i b u n g : Diesem Mikrofaziestyp werden schlecht ausgewaschene Rudstones (bis Grainstones) zugerechnet. Im Vergleich zum Mikrofaziestyp 1 hat die Häufigkeit von Trochiten erheblich abgenommen, denn Trochiten (mit maximal 4-10 mm Durchmesser) und andere Echinodermenreste bedecken nur noch 2-8 % der Fläche des Dünnschliffs. Dominierende Komponente sind die Schalenreste (ca. 30-40 % des Dünnschliffs), die bis zu 0,8 mm Dicke erreichen und hauptsächlich bis fast ausschließlich aus ehemals aragonitischen Muschelschalen bestehen. Schalen von kleinen Gastropoden, *Enantiostreon*-ähnlichen Muscheln und Brachiopoden (insbesondere *Coenothyris*-Schalen) sowie Seeigelstacheln sind selten. Die Schalen sind eingeregelt. Die Reste von Muscheln und Gastropoden zeigen kräftige Mikritrinden und zahlreiche Anbohrungen. Ooide umfassen 5-15 % der Fläche des Dünnschliffs. Es handelt sich um Normal- und Einfa-

chooide, deren konzentrische Lagen deutlich radialfaserig sind. Normalooide haben 0,3-0,9 mm Durchmesser. Einfachooide sind meist Muschelschalen, um die sich bis zu 0,3 mm dicke Ooid-Lagen gebildet haben. Bis zu 10 % des Dünnschliffs können aus undefinierbaren runden Bioklasten und Peloiden bestehen. Mikrit-Intraklasten sind selten. Ein kleiner Bioklast im Dünnschliff S17 zeigt eine dünne Lage inkrustierender Foraminiferen, die recht große Ähnlichkeit zu den von BACHMANN (1973: 31, Abb. 27) beschriebenen inkrustierenden Foraminiferen besitzen. In diesem Mikrofaziestyp dominiert Zement, und nur ca. 10 % (vereinzelt bis zu 20 %) der Fläche des Dünnschliffs besteht aus „krümelig“ aussehendem, aus Peloiden gebildetem Mikrit. Dieser Mikrofaziestyp kann durch Zunahme des Mikrit-Gehaltes fließend in den Mikrofaziestyp 3 übergehen.

Die Färbung nach FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) zeigt, daß die primär kalzitischen Muscheln, die Trochiten und der sehr gut entwickelte radialfaserige Zement A - ein Rasenzement - aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bestehen. Die zentripetal größer werdenden Kristalle des Zementes B - ein Blockzement - werden aus Kalzit unterschiedlichen Eisengehaltes aufgebaut: Die Spannweite reicht von ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis zu selten auftretendem Fe-III-Kalzit; es dominiert Fe-I-Kalzit. Im Dünnschliff S2 ist außerdem spätdiagenetisches syntaxiales Wachstum von Trochiten zu erkennen: Auf einem Trochiten sind zwei zahnförmige Rasenzemente und ein Blockzement mit Hilfe von Schmutzrändern und färbetechnisch darstellbaren Unterschieden im Eisengehalt identifizierbar, die jetzt in den Einkristall des von ihnen umgebenen Trochiten integriert sind (was im Polarisationsmikroskop mit gekreuzten Polarisatoren erkennbar ist).

Spätdiagenetischer Dolomit bedeckt ca. 2-5 % der Dünnschliff-Fläche. Es handelt sich um rhomboedrische Kristalle von 0,03-0,25 mm Durchmesser, die fleckenweise angeordnet sind. Die Dolomitisierung erfolgte bevorzugt in den Schalen der Ooide - vergleichbares beobachteten SCHNEIDER (1957: 214-216), SKUPIN (1970: 29-32, Abb. 4) und BACHMANN (1973: 54, Abb. 49-50). Aber auch der Mikrit enthält wenige mm große Dolomit-Kristalle.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Obwohl die von SCHNEIDER (1957: 202-203, Taf. 1 Fig. 1-4) aus dem Trochitenkalk des Saarlandes beschriebenen „oolithischen Kalke“, die allerdings durch ihre größere Häufigkeit von Ooiden abweichen, eine recht große Ähnlichkeit mit dem Mikrofaziestyp 2 besitzen, stimmt der Mikrofaziestyp 2 nur mit der von SCHNEIDER (1957: Taf. 2 Fig. 4) abgebildeten Ausbildung des Trochitenkalks völlig überein. Laut SCHNEIDER (1957: 204) stellt diese Ausbildung den weitaus überwiegenden Teil der im Saarland makroskopisch als „Trochitenkalk“ bezeichneten Kalksteine. Zum Vergleich bieten sich auch die von HAGDORN (1978: 59-60, Abb. 17E-F) aus dem Oberen Muschelkalk Südwestdeutschlands beschriebenen Fazies VI und Fazies VII an.

Soweit die knappe, nicht illustrierte Beschreibung des Mikrofaziestyps „Biosparit“ aus dem Oberen Muschelkalk des Hildesheimer Waldes von RÖHL (1986: 495) ein Urteil zuläßt, besteht gute Übereinstimmung mit dem Mikrofaziestyp 2. Dieser „Biosparit“ kommt laut RÖHL (1986: Abb. 3) in der (beckenseitigen) Flankenfazies und der Lagunenfazies des Trochitenkalks vor. Soweit die von AIGNER (1984: 133-134; 1985: 66-68, Abb. 32) ohne Dünnschliffbeschreibung oder -fotos gegebene Charakterisierung der von ihm im Oberen Muschelkalk Süddeutschlands beobachteten „massive shelly pack- to grainstones“ sich zu einem Vergleich eignet, entspricht dieser Gesteinstyp gut dem Mikrofaziestyp 2. Als ihren Entstehungsort nimmt AIGNER (1984: 134; 1985: 68) die seewärts (und die landwärts) gerichtete Seite einer Oolithsand-Barre im flachmarinen küstennahen Bereich an. Das in dieser Arbeit als Mikrofaziestyp 2 bezeichnete Gestein läßt sich sehr gut dem Standardmikrofaziestyp 12 von WILSON (1975: 65, Taf. 8) zuordnen.

Sedimentäres Environment und Genese: Durch die weitgehend ausgewaschene mikritische Matrix, das $\pm$ gelegentliche Auftreten von Ooiden und das Auftreten $\pm$ stenohaliner Organismen erweist sich der Mikrofaziestyp 2 als Produkt eines flachmarinen turbulenten Environments im Subtidal oberhalb der Schönwetter-Wellenbasis. Auch das häufige Auftreten von Mikritrinden spricht für gut durchlichtetes Bewegtwasser (siehe: FLÜGEL 1978: 90, 97-98, 130-133; FLÜGEL 1982: 128, 160-163).

In allen Dünnschliffen zeigt sich, daß in primär aragonitischen Schalen die aragonitische Schalensubstanz aufgelöst und durch einen kalzitischen Blockzement ersetzt wurde, während bei primär kalzitischen Schalen die Mikrostruktur der Skelettsubstanz noch erkennbar ist. Daran lassen sich primär aragonitische Schalen sehr leicht erkennen (vgl. z. B.: TUCKER & WRIGHT 1990: 13-15). In den mit blockigem Kalzit (bis Fe-Kalzit) zementierten Kalken des Mikrofaziestyps 2 werden die Umrisse der primär aragonitischen Schalen durch die Mikritrinden dokumentiert, die schon primär aus Kalzit bestanden und deshalb nicht aufgelöst wurden.

Vorkommen: Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Die durchgängig $\pm$ geringe Ooid-Führung der Mikrofaziestypen 2-4 läßt sich als Hinweis darauf werten, daß im Probenkollektiv S die oberen Teile des Trochitenkalks verwandt wurden; denn RÖHL (1986: 495) weist darauf hin, daß „vom Liegenden zum Hangenden... im Trend über das gesamte Profil des Trochitenkalks s. str. Schill und Bruchschill auf Kosten der Ooide anteilmäßig zunehmen.“ Denselben Trend bestätigen MESTWERDT & BURRE (1981: 6) für das MTB Bielefeld und SCHWENKE (1993: 60) für das gesamte Osning-Egge-Gebiet. Dazu paßt sehr gut, daß der Mikrofaziestyp 1 vermutlich den obersten Teil des Trochitenkalkes repräsentiert (siehe dort).

Mikrofaziestyp 3 (Tafel 4, Fig. 3; Tafel 5, Fig. 1-2)

FOLK-Klassifikation: Biomikrit bis ooidführender Biomikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Schalen-Wackestone bis Floatstone.

Kurzbeschreibung: In einer - zumindest zum Teil aus Peloiden entstandenen - mikritischen Matrix, die oft „Algenschläuche“ enthält, finden sich als Partikel hauptsächlich Schalenreste (ca. 15-30 % des Dünnschliffs). Crinoidenreste besitzen nur untergeordnete Bedeutung (ca. 5 % des Dünnschliffs). Ooide sind im allgemeinen selten, können aber in Einzelfällen bis zu 10-15 % des Dünnschliffs besetzen.

Beschreibung: Im Mikrofaziestyp 3 sind die wichtigste Partikelgruppe die Biogene - sie bedecken ca. 25-50 % der Fläche des Dünnschliffs. Unter ihnen spielen Trochiten, die maximal 5-9 mm Länge erreichen, nur eine untergeordnete Rolle, da sie nur ca. 2-10 % (meist ca. 5 %) des Dünnschliffs umfassen. Die vorherrschenden Biogene sind Schalenreste, da sie ca. 15-40 % (meist ca. 20-30 %) der Dünnschliff-Fläche bedecken. Die Schalen erreichen bis zu 4-10 mm Länge und 0,5-0,7 mm Dicke; sie sind disartikuliert und meist eingeregelt (seltener wirt angeordnet). Es handelt sich hauptsächlich um Schalenreste verschiedener Muscheln, unter denen Typen mit primär aragonitischer Schale dominieren. Brachiopodenschalen (Typ *Ctenothyris*) sind ziemlich häufig bis sehr selten, während Gastropoden ± selten und klein sind. Serpuliden-Röhren sind sehr selten. Die häufig auftretenden Anbohrungen beobachtet man in allen Typen von Biogenen: In primär aragonitischen Schalen sind sie besonders häufig, während sie in primär kalzitischen Schalen und Trochiten mäßig häufig sind. Die Anbohrungen haben 0,03-0,24 mm Durchmesser. In Einzelfällen lassen sich die Anbohrungen der Ichnospezies *Talpina gruberi* MAYER 1952 sicher zuordnen - siehe Taf. 5 Fig. 1 und vergleiche MAYER (1952: 450-452, 455) und SCHMIDT (1992: 57-58, Taf. 2 Fig. 7-8; 1993: 273, Abb. 3C). Primär aragonitische Schalen zeigen meist gut entwickelte Mikritrinden. Die Ooide sind typische Radialoide und haben 0,4-1,2 mm Durchmesser. Die Häufigkeit von Ooiden ist sehr variabel: In einigen Dünnschliffen fehlen sie völlig, in anderen treten sie selten oder gelegentlich (ca. 2 % der Fläche des Dünnschliffs) auf, während sie in einzelnen Fällen (S14, S15) bis zu 10-15 % der Fläche des Dünnschliffes bedecken können. Vereinzelt lassen sich echte Kotpillen beobachten, die kleine Gruppen aus ovalen Pillen (0,1-0,2 * 0,2-0,55 mm Durchmesser) mit (im Dünnschliff) auffällig dunklem - anscheinend relativ feinkörnigem - Mikrit bilden.

Zwischen den Partikeln ist eine mikritische Matrix. An wenigen Stellen läßt sich ein Aufbau dieser Matrix aus Peloiden von ca. 0,05-0,2 mm Durchmesser erkennen. Den Mikrit durchziehen häufig gegabelte, wellenförmig gebogene bis gerade gestreckte (meist weitspannig wellenartig gebogene), schlauchförmige Kanäle von 0,03-0,12 mm (meist 0,05-0,08 mm) Durchmesser, die im Querschnitt unregelmäßig rund sind (Taf. 4 Fig. 3, Taf. 5 Fig. 2; siehe auch MAY 1994d: Abb. 2-4). Die Äste sind nach einer Verzweigung dünner oder bleiben genauso dick wie vorher. Diese „Algenschläuche“ sind von sparitischem Zement erfüllt und liegen ohne Wand im Mikrit. Nur in einzelnen Fällen läßt sich erkennen, daß die Sparitfüllung der Schläuche von einem etwas dunkleren mikritischen Saum umgeben ist, der fließend in die umgebende Mikrit-Matrix übergeht. Da sie locker im Mikrit verteilte, richtungslos angeordnete, häufig verzweigte, dreidimensionale Geflechte bilden, kann es sich nicht um Schwammspiculae handeln - wie sie z. B. SCHNEIDER (1957: 205, Taf. 3) aus dem Trochitenkalk des Saarlandes beschreibt -, sondern man muß sie als Bildungen problematischer Algen deuten. Diese „Algenschläuche“ besitzen eine gewisse Ähnlichkeit mit den Filamenten der auf Cyanophyten zurückgeführten Spongiostromata-Kruste „*Pycnostroma spongilliferum*“ GÜRICH 1906, die aus dem Mitteldevon, dem Unterkarbon und der Obertrias bekannt ist (siehe: SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN 1983: 111, Taf. 3 Fig. 5, Taf. 4 Fig. 6; MAY 1992: 12, Taf. 2 Fig. 5). Da aber „*Pycnostroma*“ mikritische Krusten bildet, während die „Algenschläuche“ frei im Sediment liegen, ist eine Gleichsetzung nicht gerechtfertigt. Da die „Algenschläuche“ ± häufig auftreten, können sie die Sedimentation stark beeinflusst haben. Diese „Algenschläuche“ sind von SKUPIN (1970: 80, Taf. 4 Fig. 1-2), BACHMANN (1973: 37-38) und HÜSSNER (1993: 267-268, Abb. 4.7) aus vergleichbaren Mikrofazies des südwestdeutschen Trochitenkalkes beschrieben worden. Sie treten aber auch im Terebratelkalk des Probenkollektivs E auf (siehe Mikrofaziestyp 16). Während SKUPIN (1970: 80) und HÜSSNER (1993: 268) sie als fragliche Algenschläuche interpretieren, zieht BACHMANN (1973: 38) eine Deutung als Lebensspuren vor.

Die Färbung nach FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) zeigt, daß die primär kalzitischen Schalen aus (± eisenfreiem) Kalzit bestehen. Der Mikrit und der größte Teil des Sparits sind Fe-I-Kalzit. Morphologisch lassen sich keine Zemente A oder B unterscheiden; vielmehr handelt es sich um Blockzemente mit zentripetal zunehmender Kristallgröße. Fe-II- und Fe-III-Kalzit lassen sich nur selten und zerstreut im Blockzement von ehemals aragonitischen Schalen und von „Algenschläuchen“ nachweisen. Sowohl in der mikritischen Matrix als auch im Zement läßt sich eine spätdiagenetische Dolomitisierung feststellen: Von fleckenweise (bzw. nesterweise) angeordneten 0,05-0,15 mm großen Dolomit-Kristallen werden ca. 2-5 % des Dünnschliffs bedeckt. Sofern Ooide vorhanden waren, wurden diese bevorzugt dolomitisiert. Es lassen sich auch selten bis häufig Spuren von Dedolomitisierung beobachten, erkennbar daran, daß Dolomit-Kristalle einen

braungefärbten Rand zeigen und daß innerhalb einzelner Dolomit-Nester zwischen den Kristallen braunes Gemenge entwickelt ist. Die braunen Ränder bei beginnender Dedolomitisierung beruhen auf der Freisetzung geringer Mengen von Fe^{2+} und dessen Oxidation zu Fe^{3+} (AS-SARURI & LANGBEIN 1990: 1011-1012). Die Dedolomitisierung führt zu einem kleinteilig verzahnten, im Dünnschliff trüben und gelbbraunlichen Kornmosaik.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Auf den ersten Blick sind die von SCHNEIDER (1957: 206-207, Taf. 2 Fig. 5, Taf. 4 Fig. 1-6, Taf. 5 Fig. 1-3) aus dem oberen Teil des saarländischen Trochitenkalks beschriebenen „Bruchschill-Kalke“ sehr gut vergleichbar mit den hier beschriebenen Mikrofaziestypen 3 und 2. Da die „Bruchschill-Kalke“ von SCHNEIDER (1957) aber in zwei wichtigen Punkten abweichen - die Schalenreste stammen fast ausschließlich von *Coenothyris* und „Algenschläuche“ treten nicht auf -, ist davon auszugehen, daß sich ihr Ablagerungsmilieu von dem der Mikrofaziestypen 2 und 3 deutlich unterschied.

Zum Vergleich heranziehen muß man auch die von SKUPIN (1970: 84-91; 1973: 6-8) im Trochitenkalk Südwest-Deutschlands unterschiedenen Mikrofazies II (Lamellibranchiaten-Crinoiden-Fazies) und III (Lamellibranchiaten-Crinoiden-Brachiopoden-Übergangsfazies), die fließend ineinander übergehen. Diese Mikrofazies II und III unterscheiden sich vom Mikrofaziestyp 3 in zwei Punkten: Zum einen enthalten sie keine „Algenschläuche“, zum anderen enthalten sie mehr Trochiten (Mikrofazies II: 10-25 %) bzw. Brachiopoden-Schalen (Mikrofazies III). Da sowohl Crinoiden als auch artikulate Brachiopoden $\pm$ stenohaline Organismen sind, könnte das ein Hinweis auf Unterschiede im Salzgehalt des Meereswassers sein. SKUPIN (1970: 89, 91; 1973: 12) interpretiert seine Mikrofazies II und III als Ablagerungen eines wechselnd bewegten Wassers.

Sehr große mikrofazielle Ähnlichkeit besitzt die Kalkstein-Bank, auf deren Oberseite das von HESSE (1991) beschriebene Bad Driburger *Encrinus*-Massenvorkommen erhalten ist. Diese am Top des Trochitenkalks befindliche Bank stimmt zwar in Gefüge und Komponentenzusammensetzung sehr gut mit dem Mikrofaziestyp 3 überein, aber die Beschreibung und die Abbildungen von HESSE (1991: 14, 40-41, 44, Taf. 4) geben keinen Hinweis auf die Existenz von „Algenschläuchen“. HESSE (1991: 28-30) nimmt für das *Encrinus*-Massenvorkommen eine Entstehung im flachen Subtidal zwischen der Sturm-Wellenbasis und der Schönwetter-Wellenbasis an.

Sedimentäres Environment und Genese: Bei der Interpretation der Ablagerungsbedingungen des Mikrofaziestyps 3 muß die Bedeutung der mikritischen Matrix geklärt werden, die diesen Mikrofaziestyp vom Mikrofaziestyp 2 unterscheidet. Das Auftreten einer mikritischen Matrix kann im allgemeinen als Hinweis auf geringe Wasserenergie verwandt werden. Allerdings gibt es zwei Gründe, die eine Übertragung dieses Interpretationsmusters auf den Mikrofaziestyp 3 als fraglich erscheinen lassen:

- Der stellenweise nachweisbare Aufbau des Mikrits aus Peloiden gibt Grund zur Annahme, daß ein großer Teil des Mikrits - oder gar die gesamte mikritische Matrix - durch die Kompaktion von Peloiden entstand. Transport und Ablagerung von Peloiden lassen aber eine erheblich höhere Wasserenergie als bei Mikrit-Schlamm zu.
- Es ist damit zu rechnen, daß die Thalli oder Filamente, die die „Algenschläuche“ erzeugten, eine sedimentbindende Wirkung besaßen und somit Sediment fixierten, das normalerweise aufgrund der Wasserenergie nicht hätte abgelagert werden dürfen. So läßt es sich auch erklären, daß die „Algenschläuche“ in einem Oolith (!) mit mikritischer Grundmasse auftreten können - Beispiele dafür liefern der Mikrofaziestyp 16 und SKUPIN (1970: 80)

Diese Argumente sprechen dafür, daß der Mikrofaziestyp 3 unter den gleichen Bedingungen wie der Mikrofaziestyp 2 entstand (siehe dort). Das würde auch ihre fließenden Übergänge erklären. Das Material von HESSE (1991) liefert keinen Beleg für eine Sedimentation des Mikrofaziestyps 3 zwischen der Sturm-Wellenbasis und der Schönwetter-Wellenbasis; denn es ist damit zu rechnen, daß dieser Kalkstein in etwas tieferem, stillerem Wasser als der Mikrofaziestyp 3 abgelagert wurde, da „Algenschläuche“ in ihm fehlen.

Vorkommen: Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks (siehe auch Mikrofaziestyp 2). Proben des Mikrofaziestyps 3 liegen nicht nur aus dem Probenkollektiv S (Bielefeld) sondern auch aus dem Steinbruch westlich der Straße Helpup-Währentrop vor.

Mikrofaziestyp 4

(Tafel 4, Fig. 4)

FOLK-Klassifikation: Biogenführender/ooidführender Mikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Wackestone bis Mudstone.

Kurzbeschreibung: In der mengenmäßig weit überwiegenden Matrix aus Mikrit schwimmen Ooide (ca. 2-7 % des Dünnschliffs), Crinoidenreste (ca. 2-5 % des Dünnschliffs) und dünne Muschelschalen (ca. 2-10 % des Dünnschliffs). Das Gestein ist durchwühlt.

Beschreibung: In diesem Mikrofaziestyp dominiert die mikritische Matrix. Das Gestein ist bioturbat durchwühlt, denn der Mikrit zeigt wolkige Hell-Dunkel-Differenzierungen, und Partikel sind an den Rändern wolkig begrenzter Flecken gehäuft und in ihrem Mittelbereich auffällig selten. Im Mikrit lassen sich stellenweise Peloiden schemenhaft erkennen, aber „Algenschläuche“ treten nur sehr selten auf. Bis zu 4 mm große Echinodermenreste (Trochiten-Fragmente) umfassen 2-5 % des Dünnschliffs, während dünne (bis zu 0,3-0,7 mm dicke), ehemals aragonitische Schalen (hauptsächlich Muscheln, selten kleine Gastropoden) 2-10 % des Dünnschliffs bedecken. 0,5-1 mm durchmessende Ooide besetzen 2-7 % (meist ca. 5 %) der Fläche des Dünnschliffs. Da die Ooid-Lagen fast immer vollständig dolomitisiert sind, lassen sich die Ooide nur aufgrund ihrer Form und der Ummantelung andersartiger Kerne erkennen.

Dolomit ist fleckenweise angeordnet. Dolomitisiert wurden hauptsächlich Ooide, untergeordnet Muschelschalen; aber auch in der aus Fe-I-Kalzit bestehenden mikritischen Matrix finden sich kleine Dolomit-Kristalle. Die Dolomit-Kristalle der Nester zeigen randlich Spuren von Dedolomitisierung.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Das in dieser Arbeit als Mikrofaziestyp 4 bezeichnete Gestein entspricht ziemlich gut dem Standardmikrofaziestyp 9 von WILSON (1975: 65, Taf. 6 B). Große Ähnlichkeit zum Mikrofaziestyp 4 besitzt auch die von HAGDORN (1978: 59, Abb. 17D) aus dem südwestdeutschen Oberen Muschelkalk beschriebene Fazies V.

Sedimentäres Environment und Genese: WILSON (1975: 65) interpretiert dieses Gestein als ein Sediment des flachen Schelfmeeres mit offener Wasserzirkulation, das an (oder direkt unterhalb) der Wellenbasis entstand.

Vorkommen: Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks (siehe auch Mikrofaziestyp 2). Proben des Mikrofaziestyps 4 liegen nicht nur aus dem Probenkollektiv S (Bielefeld) sondern auch aus dem Steinbruch westlich der Straße Helpup-Währentrup vor.

Mikrofaziestyp 5

(Tafel 5, Fig. 3)

FOLK-Klassifikation: Biomikrit bis biogenführender Mikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Schalen-Wackestone (bis Floatstone) bis Mudstone mit Schalen.

Kurzbeschreibung: In einer mikritischen Matrix schwimmen dünne, nicht eingeregelter Muschelschalen (ca. 5-15 % des Dünnschliffs). Daneben treten detritische Silikat Körner (Feldspat und Quarz) und (authigene?) Dolomit-Kristalle auf. Es handelt sich um ein bis mehrere cm dicke bioturbate Tempestit-Lagen, die in Sedimente vom Mikrofaziestyp 7-9 eingelagert sind.

Beschreibung: Das Gestein des Mikrofaziestyps 5 besteht zu ca. 5-20 % aus Muschelschalen. Der Gehalt an Muschelschalen kann zwischen verschiedenen Dünnschliffen zwischen ca. 5 % und ca. 10-20 % schwanken. Erstere sind biogenführende Mikrite (bzw. Mudstones mit Schalen), letztere Biomikrite (bzw. Wackestones). Die Muschelschalen schwimmen nicht eingeregelt in Mikrit, erreichen bis zu 0,3-0,5 mm Dicke und bestanden primär aus Aragonit. Jetzt sind die Muschelschalen Hohlräume, die mit einem sparitischen Zement aus Fe-I-Kalzit entweder - bei geringer Dicke der Schale - vollständig erfüllt oder - bei größerer Dicke - randlich ausgekleidet sind. In einzelnen Proben können in größeren Hohlräumen auf den dünnen Sparitsaum des Fe-I-Kalzites (1. Zementgeneration) auch noch Blockzemente aus Fe-II-Kalzit (2. Zementgeneration) und ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit (3. Zementgeneration) folgen. Gastropodenschalen sind sehr selten und klein. In der mikritischen Matrix schwimmen neben den Muschelschalen auch xenomorphe bis idiomorphe Kristalle von (0,02-) 0,03-0,15 (-0,25) mm Größe, die sich nicht färben lassen - weit überwiegend Dolomit, sowie Quarz und Feldspat. Diese Kristalle und Körner bedecken ca. 5-10 % (meist ca. 7 %) des Dünnschliffs. Der Feldspat ist z. T. sicher authigen im Sediment entstanden. Die Färbung nach FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) zeigt, daß der Mikrit aus Fe-I-Kalzit besteht. Im Mikrit finden sich feinverteilte kleine Dolomit-Kristalle.

Der Mikrofaziestyp 5 bildet Lagen von 8-14 mm bis zu mehr als 30 mm Dicke. Sie sind mit einer unregelmäßig welligen Erosionsbasis in Sedimente des Mikrofaziestyps 7-9 eingelagert. Nach oben geht die Muschelschill-Lage in einen undeutlich laminierten Mikrit (Mikrofaziestyp 7-8) über, der keine Schalen und nur selten nicht färbbare Kristalle enthält. Die Muschelschill-Lage zeigt Spuren von Bioturbation; deshalb ist auch die Obergrenze zum Normalsediment bioturbat überprägt (und dadurch verwischt). Es ließ sich sowohl

beobachten, daß zwei (dünne) Muschelschill-Lagen mit ca. 15 mm Abstand aufeinander folgten, als auch, daß eine mehr als 30 mm dicke Schillbank aus drei Schill-Lagen zusammengesetzt war. An der Basis einer Muschelschill-Lage beobachtet man gelegentlich braun umrindete (randlich dedolomitisierte) runde Dolomit-Körner, wie sie im Mikrofaziestyp 6 häufig und charakteristisch sind. Der Wackestone mit Muschelschalen der Probe K24 vermittelt zwischen den Mikrofaziestypen 5 und 6.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Der Mikrofaziestyp 5 läßt sich sehr gut mit den von LUKAS (1991: 135-136, Taf. 3 Fig. 3) aus dem Horizont der Terebratelbänke (Unterer Muschelkalk) in Hessen beschriebenen „Schill Floatstones-Packstones“ vergleichen. Die „Schill Floatstones-Packstones“ unterscheiden sich nur durch die größere Dicke der Lagen (ca. 100 mm Dicke), das Fehlen von Bioturbation und die z. T. größere Packungsdichte der Schalen vom Mikrofaziestyp 5. Sehr große Ähnlichkeit besitzen auch von RÖHL (1986: Abb. 5/1-2) in den Ceratitenschichten (oberer Oberer Muschelkalk) gefundene proximale (bzw. relativ proximale) Tempestite. Unter den von AIGNER (1984, 1985) im Oberen Muschelkalk Süddeutschlands unterschiedenen Gesteinstypen bieten sich die „graded skeletal sheets“, die proximale Tempestite sind, und die „thin bedded limestone/marlstone alternations“, die distale Tempestite umfassen, zum Vergleich an (siehe AIGNER 1984: 135-137; 1985: 78-90). Der Mikrofaziestyp 5 vermittelt zwischen diesen beiden Gesteinstypen durch die Dicke der Schill-Lagen und die Packungsdichte der Schalen (vgl. AIGNER 1984, 1985).

Der Mikrofaziestyp 5 läßt sich in die von THIELE (1990: 13-14) als Schillkalke bezeichnete Gruppe von Gesteinen des Unteren Muschelkalks, bzw. in den Mikrofaziestyp „Biomikrudite-Biomikarenite“ von THIELE (1990: 41-42, Abb. 17-18) einordnen. Soweit die knappe Beschreibung der „storm generated skeletal beds and lenses“ von TÖRÖK (1993: 135, Abb. 7) ein Urteil zuläßt, tritt ein dem Mikrofaziestyp 5 vergleichbares Gestein auch im Wellenkalk des Muschelkalks von Ungarn auf. Der Mikrofaziestyp 5 ist ein Sturmschill im Sinne der Gliederung von STRAUCH (1990), obwohl er im Gegensatz zu den von STRAUCH (1990: 425-426) angeführten känozoischen Sturmschillen artenarm ist.

Sedimentäres Environment und Genese: Die scharfe Untergrenze und der fließende Übergang nach oben ins feine Normalsediment erweist die Schille des Mikrofaziestyps 5 als bioturbat überprägte Tempestit-Lagen - vergleiche AIGNER (1977, 1982, 1984, 1985), MEHL (1982) und SEILACHER & AIGNER (1991). Es ist davon auszugehen, daß der Mikrofaziestyp 5 so wie die sehr gut vergleichbaren „Schill Floatstones-Packstones“ gebildet wurde, für die LUKAS (1991: 136) folgende Genese annimmt: „Diese Tempestite sind wahrscheinlich dadurch entstanden, daß bei Stürmen eine autochthone bis parautochthone Anreicherung von Organismen, z. B. durch exhumieren von Muscheln, ohne signifikanten Transport stattgefunden hat.“ Der Vergleich mit den Angaben von AIGNER (1984: 135-137; 1985: 78-90) und RÖHL (1986) läßt eine Deutung als Tempestite zu, die weder besonders proximal noch besonders distal sind.

Die Tempestite belegen zwar ein marines Environment, aber die geringe Größe der Muschelschalen, die geringe Faunendiversität und das Fehlen ± stenohaliner Organismen (wie z. B. artikulate Brachiopoden) verweisen auf einen abweichenden und/oder schwankenden Salzgehalt des Meereswassers. Ein Blick auf den Mikrofaziestyp 10 läßt dann an hypersaline Verhältnisse denken. Bathymetrisch muß der Mikrofaziestyp 5 zwischen der Sturm-Wellenbasis und der Schönwetter-Wellenbasis eingeordnet werden.

Vorkommen: Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Vermutlich mehr oder weniger auf den Horizont der Oolithbänke [= Oolithbank-Member der Nomenklatur von HAGDORN, HORN & SIMON (1993)] beschränkt.

Mikrofaziestyp 6

(Tafel 5, Fig. 4)

FOLK-Klassifikation: Detritischer Mikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Detritus-Wackestone.

Kurzbeschreibung: In einer mikritischen Matrix liegen zahlreiche Detritus-Körner von 0,03-0,3 mm Durchmesser. Es handelt sich um kleine Mikrit-Intraklasten, Silikatkörner (Feldspat und Quarz) und (authigene?) Dolomit-Kristalle. Daneben treten vereinzelt Muschelschalen auf. Dieses Gestein ist ± homogen und zeigt keine Schichtung, bestenfalls eine angedeutete Gradierung. Es bildet mehrere cm dicke Tempestit-Lagen, die in Sedimente des Mikrofaziestyps 7-8 eingelagert sind.

Beschreibung: Der Mikrofaziestyp 6 besteht aus ± homogenen Wackestones, die ca. 10-110 mm dicke Lagen in einem Normalsediment vom Mikrofaziestyp 7-8 bilden. In einem Teil der Dünnschliffe läßt sich eine scharfe, erosiv bedingte Untergrenze der Wackestone-Lagen erkennen. Die Wackestones werden aus in Mikrit (= Fe-I-Kalzit) schwimmenden, eckigen Detritus-Körnern von 0,03-0,15 mm Durchmesser (meist

ca. 0,06-0,07 mm, selten bis zu 0,3 mm) aufgebaut, bei denen sich drei Gruppen unterscheiden lassen:

- Dolomitmörner, die oft dedolomitisert und dann braun gefärbt sind. [Daß diese Dolomitmörner bei der Sedimentation der Wackestones als Klasten abgelagert wurden und nicht später diagenetisch entstanden, läßt sich daran erkennen, daß sie - wenn das Gestein Gradierung zeigt - ebenso wie die anderen Komponenten gradiert sind. Braune Färbung entsteht durch Oxidation geringer Mengen von Fe^{2+} zu Fe^{3+} (AS-SARURI & LANGBEIN 1990: 1011-1012)].
- relativ dunkle, wie kleine Mikrit-Intraklasten aussehende Pelloide, die - wie die Matrix - aus Fe-I-Kalzit bestehen.
- siliziklastischer Detritus (Quarz und Feldspat).

Dolomitmörner und kalzitische Pelloide sind die häufigsten Detritus-Körner, während siliziklastischer Detritus eine untergeordnete Rolle spielt und nur ca. 2-10 % der Fläche des Dünnschliffs bedeckt. In einem Teil der Proben finden sich $\pm$ selten dünne Schalenreste (mit 0,010-0,15 mm Dicke). Die Wackestones zeigen oft eine $\pm$ angedeutete Gradierung, die sich in der Probe K4, die zum Mikrofaziestyp 8 vermittelt, bis zu einer undeutlichen Schichtung steigert. Die Detrituskörner umfassen 30-50 % des Dünnschliffs.

Der Dünnschliff K8 zeigt das Vorrücken der Dedolomitisierung: Wo das Gestein im Dünnschliff grau ist, ist auch der Dolomit frisch und farblos durchscheinend, während der Dolomit in den gelbbraun gefärbten Bereichen deutliche Spuren von Dedolomitisierung trägt (die Kristalle sind unansehnlich bräunlich trüb).

A n m e r k u n g : In der Probe B7 aus dem oberen Teil (= muOc) des Horizontes der Oolithbänke im Steinbruch im Botanischen Garten waren in einer 20 mm dicken Lage des Mikrofaziestyps 6 bis zu 2,5 mm dicke und 20 mm lange, flache Mikrit-Schlammgerölle ziemlich selten eingelagert. In der an gleicher Stelle 20 cm darüber dem muOc entnommenen Probe B8 fanden sich in einer 33 mm dicken Lage des Mikrofaziestyps 6 vereinzelt wenige Millimeter große Intraklasten aus gelbbraunem Mikrit (möglicherweise Material des Mikrofaziestyps 10). Beide Proben belegen, daß der Sedimentation des Mikrofaziestyps 6 (zumindest stellenweise) eine Erosion älterer Sedimente vorausging.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Es fanden sich in der vorliegenden Literatur keine vergleichbaren Mikrofaziestypen.

Sedimentäres Environment und Genese: Die angedeutete Gradierung, die Übergänge zum Mikrofaziestyp 5 (siehe dort), die Erosion älterer Mikrite und die Einlagerung in Sedimente des Mikrofaziestyps 7-8 belegen eine Interpretation als Tempestite. Das sedimentäre Environment des Mikrofaziestyps 6 ist dem des Mikrofaziestyps 5 sehr ähnlich.

Bemerkenswert für den Mikrofaziestyp 6 sind die zahlreichen Dolomit-Körner. Möglicherweise stammte dieser Dolomit aus Küstensebkhas, aus denen er durch Sturmfluten eingeschwemmt wurde. Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist die Ansicht von LUKAS & WENZEL (1988: 122), daß der Dolomit-Gehalt der von ihnen im Unteren Muschelkalk Hessens beobachteten stark bioturbaten Gelbkalke aus Küstensebkhas eingeweht sei. Für ein Einschwemmen und gegen ein Einwehen im Osnabrücker Wellenkalk spricht die Häufung der Dolomitmörner in den Tempestiten (im Vergleich zum Normalsediment).

V o r k o m m e n : Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Vermutlich auf den oberen Teil (= muOc) des Horizontes der Oolithbänke [= Oolithbank-Member] beschränkt.

Mikrofaziestyp 7

(Tafel 5, Fig. 5)

F O L K - K l a s s i f i k a t i o n : Mikrit (bioturbat).

D U N H A M - K l a s s i f i k a t i o n : Mudstone (bioturbat).

K u r z b e s c h r e i b u n g : Undeutlich laminierter Mikrit, der in wechselndem Umfang Detritus führt. In ein detritusarmes Sediment sind dünne Lagen detritusreicher Mikrite eingeschaltet. Das Gestein ist intensiv durchwühlt, zeigt aber trotzdem eine ausgeprägte Schichtung. Stylolithen sind häufig und gut entwickelt. Bioturbation und Stylolithen erzeugen ein $\pm$ knollig-lagiges Gefüge.

B e s c h r e i b u n g : Der Mikrofaziestyp 7 besteht aus undeutlich laminierten Detritus-führenden Mudstones, in die 1,5-7 mm (sehr selten bis zu 15 mm) dicke Lagen detritischer Wackestones eingelagert sind. Die Wackestone-Lagen sind (normal) gradiert und zeigen z. T. eine scharfe Basis. In beiden Gesteinen besteht der Detritus aus 0,03-0,3 mm durchmessenden Körnern von Silikat (Quarz und Feldspat) und Dolomit. Die silikatischen Körner sind zwar meist xenomorph, hin und wieder aber treten idiomorphe Kristalle (z. B. authigene Feldspäte) auf. Die Dolomitmörner sind z. T. dedolomitisert. Die Grundmasse ist ein Mikrit, der

sich durch die von FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) beschriebene Färbung als Fe-I-Kalzit mit feinverteiltem Dolomit erweist. In einzelnen Dünnschliffen (z. B. K5) lassen sich in der Matrix zerstreute Sulfid-Flecken beobachten, die jetzt oxidiert sind. Der Unterschied zwischen den Mudstones und den Wackestones liegt darin, daß die Mudstones nur ca. 3 % Detritus führen, während die Wackestones 10-30 % Detritus enthalten.

Das Gefüge des gesamten Gesteins ist sehr stark durch Bioturbation geprägt. Die $\pm$ häufig auftretenden Wühlspuren verwischen die sehr gut entwickelte Schichtung. Wühlspuren, die von ungeschichtetem, stylolithenfreiem Sediment erfüllt sind, durchziehen häufig das Gestein. Da ihre Füllung den detritischen Wackestone-Lagen dieses Mikrofaziestyps entspricht, fallen sie in den Mudstones sehr auf. Die aufgrund ihrer zylindrischen Form, dem Fehlen einer Wand und der von der Umgebung abweichenden Sedimentfüllung als *Planolites* NICHOLSON 1873 bestimmten Gänge (siehe PEMBERTON & FREY 1982: 848-850, 864-866) haben 3-5 mm Durchmesser. In ihrer Umgebung beobachtet man gelegentlich von Sparit aus Fe-I-Kalzit erfüllte Gips pseudomorphosen von 0,3-0,5 mm Länge. Im Dünnschliff treten zusammen mit *Planolites* oder stattdessen flaserig-wolkige Strukturen auf, die sich z. T. als Spreitenbauten zu erkennen geben. Zusammen mit *Planolites* wurden auch noch andere, unidentifizierbare Wühlspuren beobachtet.

Der Mudstone zeigt häufig flaserig angeordnete feine braune Linien. Es sind mit toniger Substanz angereicherte Stylolithen. In den meisten Teilen eines Dünnschliffs sind sie zerstreut und relativ schwach entwickelt. Sie vereinigen sich hin und wieder zu dicken braunen Bändern. Die Stylolithen verlaufen z. T. schichtparallel, z. T. begrenzen sie die Wühlspuren (= sie verlaufen am äußeren Rand der Sedimentfüllung entlang), wobei man häufig beobachtet, daß im Mudstone schichtparallel verlaufende Stylolithen am Kontakt mit der Lebensspur abbiegen und sich an sie schmiegen. In der Umgebung der Lebensspuren sind die Stylolithen auffällig häufig und gut entwickelt. Durch das Zusammenwirken von Lamination, Bioturbation und Stylolithen entsteht das für diesen Mikrofaziestyp charakteristische knollig-lagige Gefüge.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Gesteine, die den Mikrofaziestypen 7 und 8 entsprechen, werden als „Wellenkalke“ von SCHWARZ (1975: 11-12) aus dem Unteren Muschelkalk Südwest-Deutschlands sowie von LUKAS (1991: 136-137) und KLOTZ (1992: 38-40) aus dem Unteren Muschelkalk Hessens und Frankens beschrieben - insbesondere der von LUKAS (1991: Taf. 3 Fig. 6) abgebildete Peel und der von SCHWARZ (1975: Abb. 28b) abgebildete Dünnschliff stimmen völlig mit dem Mikrofaziestyp 7 überein. LUKAS (1991: 136) weist darauf hin, daß die für diese „Wellenkalke“ charakteristische Spurenfossilien-Assoziation im Intertidal und besonders häufig im Subtidal vorkommt. Nach einer ausführlichen Diskussion interpretiert LUKAS (1991: 137) die Wellenkalke im Horizont der Terebratulabänke sowohl als lagunäre (fraglich mit einem intertidalen Anteil) als auch als (subtidale) Becken-Sedimente. SCHWARZ (1975: 12) nimmt an, daß die Wellenkalke auf einer Gezeitenfläche („tidal flat“) und z. T. in sehr flachem Subtidal entstanden.

Vergleichbar ist der von BACKHAUS & FLÜGEL (1971: 206) im Unteren Muschelkalk des Odenwaldes unterschiedene „MF 2“. Ob die von DAHMER & HILBRECHT (1986: 517) erwähnten „Knauerkalke“ dem Mikrofaziestyp 7 entsprechen, ist fraglich; denn zum einen reicht ihre Beschreibung nicht zu einer sicheren Identifizierung aus und zum anderen weicht das, was ERNST & WACHENDORF (1968: 180-181, Taf. 4 Fig. 1-2) als „Knauerkalk“ beschreiben, erheblich vom Mikrofaziestyp 7 ab.

Der Mikrofaziestyp 7 entspricht einem Teil der von THIELE (1990: 16-17) als „Wellenkalk i.e.S.“ bezeichneten Sedimente des Unteren Muschelkalks am Nordrand der Rheinischen Masse. Dem Mikrofaziestyp 7 vergleichbare Gesteine beschreibt TÖRÖK (1993: 134, Abb. 3, 4, 6) aus dem Wellenkalk des Muschelkalks von Ungarn und wertet die reiche Ichnofauna als Beweis für gute Sauerstoffversorgung am Meeresboden (= oxisches Milieu).

Sedimentäres Environment und Genese: Die in der Literatur erfolgten Einstufungen der Mikrofaziestypen 7-9, die die Hauptmasse der stratigraphischen Einheit „Wellenkalk“ bilden, sind durchaus widersprüchlich, während sich die Mikrofaziestypen 5, 6 und 10 leichter und eindeutig einem sedimentären Environment zuordnen lassen. Deshalb ist es m. E. nützlich, zuerst herauszuarbeiten, wie der Zusammenhang der verschiedenen Mikrofaziestypen ist. Dabei zeigte die Aufnahme des Steinbruchs im Botanischen Garten Osnabrück ebenso wie die Durchsicht der Literatur (SCHULZ 1972: 140; LANGER 1989: 27-28; THIELE 1990: 18, 80), daß folgende Abfolge vom Liegenden zum Hangenden im Unteren Muschelkalk immer wieder auftritt: Tempestit-Bänke (intraklastenreiche konglomeratische Kalke und/oder Mikrofaziestyp 5 und/oder Mikrofaziestyp 6) - Wellenkalke (Mikrofaziestypen 7-9) - Gelbkalke (Mikrofaziestyp 10). Diese Abfolge ist ein asymmetrischer Zyklus, denn der rückläufige Ast ist unterdrückt. Es handelt sich um Zyklen, bei denen sich die Wassertiefe ändert, wie sie vielfach aus flachmarinen Karbonaten beschrieben werden - es sind „shallowing-upward“-Zyklen, in denen im dokumentierten Ast die Wassertiefe abnimmt. (Eine ausführliche Diskussion der Zyklen erfolgt im Kap. 6.2.).

Nun ist es möglich, über die bathymetrischen Aussagen der Anfangs- und Endglieder den Rahmen der dazwischen liegenden Wellenkalke einzugrenzen: Da die Mikrofaziestypen 5 und 6 zwischen der

Sturm-Wellenbasis und der Schönwetter-Wellenbasis abgelagert wurden und der Mikrofaziestyp 10 im hohen Intertidal und Supratidal entstand, muß das sedimentäre Environment der Mikrofaziestypen 7 bis 9 zwischen Sturm-Wellenbasis und Supratidal liegen. Desweiteren ist auffällig, daß Gesteine des Mikrofaziestyps 7 nur in den tieferen Teilen der Zyklen auftreten - worauf SCHULZ (1972: 140) hinweist und was ich selbst im Steinbruch im Botanischen Garten Osnabrück beobachten konnte -; sie lassen sich demzufolge ins Subtidal einordnen. Für die Mikrofaziestypen 8 und 9 bleiben dann das flache Subtidal und das Intertidal übrig. Eine Entstehung von Gesteinen der Mikrofaziestypen 8 und 9 im Intertidal-Bereich wird auch durch das von LANGER (1989: 25-26) beschriebene und im Steinbruch im Botanischen Garten Osnabrück in diesen Gesteinen beobachtbare stellenweise Auftreten von Trockenrissen bestätigt.

Die Lagen aus detritischen Wackestones, die in den Mikrofaziestypen 7-9 auftreten, müssen aufgrund ihrer sedimentologischen Merkmale als Tempestit-Lagen gedeutet werden. Da sie aus kleineren Partikeln als die Mikrofaziestypen 5 und 6 bestehen, sind sie wahrscheinlich bei geringerer Wasserturbulenz als die Mikrofaziestypen 5 und 6 abgelagert worden. Die auffällige Fossilarmut der Mikrofaziestypen 7-9 spricht für extreme Bedingungen: zeitweiliges Trockenfallen (Intertidal-Bereich) und/oder hypersaline Verhältnisse. Die beobachteten Gips pseudomorphosen sind in diesem Zusammenhang nicht unbedingt aussagekräftig, da ähnliche - offensichtlich diagenetisch entstandene - Gips pseudomorphosen auch aus vollmarin subtidalen Sedimenten mit reicher Fauna bekannt sind. Ein Beispiel mit ausführlicher Diskussion liefert MAY (1993: 53) aus Korallenkalken des Mitteldevons. SEILACHER (1993: 221) versucht, die Fossilarmut des typischen Wellenkalks dadurch zu erklären, daß er ihn als Produkt einer tieferen Beckenfazies mit euxinischen Bedingungen interpretiert. Zumindest für den Osnabrücker Wellenkalk ist SEILACHER's Deutung nicht annehmbar, da sich die reiche Ichnofauna (Mikrofaziestyp 7-8), die Trockenrisse (Mikrofaziestyp 8-9), die durchgängig hellen Gesteinsfarben (= kein feinverteiltes Sulfid und/oder organische Substanz) und die Vergesellschaftung mit dem Mikrofaziestyp 10 damit nicht in Einklang bringen lassen.

V o r k o m m e n : Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks.

Mikrofaziestyp 8 (Tafel 6, Fig. 2)

F O L K - K l a s s i f i k a t i o n : Mikrit (bioturbat).

D U N H A M - K l a s s i f i k a t i o n : Mudstone (bioturbat).

K u r z b e s c h r e i b u n g : Das Gestein entspricht weitgehend Mikrofaziestyp 7. Es ist schwach bis intensiv durchwühlt. Stylolithen sind $\pm$ selten und schwach entwickelt. Man beobachtet kein knolliges Gefüge, aber eine ausgeprägte Schichtung.

B e s c h r e i b u n g : Ebenso wie der Mikrofaziestyp 7 besteht der Mikrofaziestyp 8 aus undeutlich laminierten Detritus-führenden Mudstones, in die in einem Abstand von 0,5-5 mm dünne Lagen detritischer Wackestones eingelagert sind. Die Wackestone-Lagen enthalten bis zu 0,1 mm (sehr selten bis 0,3 mm) große Detritus-Körner und zeigen oft eine Erosionsbasis sowie eine (normale) Gradierung. Die Grundmasse ist ein Mikrit, der sich durch die von FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) beschriebene Färbung als Fe-I-Kalzit mit feinverteiltem Dolomit erweist.

Die lagige Textur des Sedimentes wird ziemlich selten bis häufig durch Bioturbation gestört. Entweder beobachtet man im Dünnschliff wolkig-flaserige Strukturen, die im wesentlichen wohl Spreitenbauten sind (z. T. sicher nachgewiesen), oder man findet Planolites-artige Wühlspuren. Das Gestein enthält nur sehr selten bis gelegentlich $\pm$ schwach entwickelte Stylolithen. Die im Vergleich zum Mikrofaziestyp 7 geringere Häufigkeit und Entwicklung von Lebensspuren und Stylolithen führt zu einem lagigen - nie knolligen - Gefüge des Gesteins.

A n m e r k u n g : Der diesem Mikrofaziestyp zugeordnete Mauerstein K 28 vermittelt durch seine intensiv gelbe Färbung und das seltene Auftreten von Drusen, die mit Kalzit-Kristallen ausgekleidet sind, zum Mikrofaziestyp 10. Da er aber im Dünnschliff in Gefüge und Mineralogie den anderen Vertretern des Mikrofaziestyps 8 entspricht und auch nicht geochemisch abtrennbar ist, wird er dem Mikrofaziestyp 8 zugerechnet. Im Steinbruch im Botanischen Garten Osnabrück bilden derartige laminierte, intensiv gelbe Kalke mehrfach den stratigraphischen Übergang zwischen den laminierten Kalken und den typischen Gelbkalken des Mikrofaziestyps 10.

V e r g l e i c h e m i t i n d e r L i t e r a t u r b e s c h r i e b e n e n M i k r o f a z i e s t y p e n : Dem Mikrofaziestyp 8 vergleichbare Gesteine werden von ERNST & WACHENDORF (1968: 181) aus der „Schaumkalk-Serie“ des Unteren Muschelkalkes Ost-Niedersachsens als „Wellenkalk“ beschrieben. Das häufige Auftreten von Rhizocorallium werten sie als Beleg für eine Entstehung im Einflußbereich der Gezei-

ten (ERNST & WACHENDORF 1968: 182). Der Beschreibung von DAHMER & HILBRECHT (1986: 518) nach zu urteilen, scheinen die von ihnen im Unteren Muschelkalk Nordhessens gefundenen „ebenflächigen Plattenkalke“ und „unebenflächigen Plattenkalke“ meinem Mikrofaziestyp 8 vergleichbar zu sein.

Dem Mikrofaziestyp 8 (sowie dem Mikrofaziestyp 9) entsprechen die von THIELE (1990: 16) als „plattige Kalke“ bezeichneten Sedimente des Unteren Muschelkalks am Nordrand der Rheinischen Masse.

Sedimentäres Environment und Genese: Eine ausführliche Diskussion erfolgt beim Mikrofaziestyp 7.

Vorkommen: Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks.

Mikrofaziestyp 9

(Tafel 6, Fig. 3)

FOLK-Klassifikation: Mikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Mudstone.

Kurzbeschreibung: Das Gestein entspricht weitgehend den Mikrofaziestypen 7 und 8. Es zeigt aber keine Bioturbation. Man beobachtet kein knolliges Gefüge, aber eine ausgeprägte Schichtung.

Beschreibung: Vergleichbar den Mikrofaziestypen 7 und 8 besteht der Mikrofaziestyp 9 aus undeutlich laminierten Mudstones mit fein verteilten, 0,05-0,15 mm durchmessenden Detritus-Körnern, in die wenige mm dicke Lagen detritischer Wackestones eingelagert sind. Die Wackestone-Lagen enthalten bis zu 0,3 mm große Detritus-Körner. Ihr Detritus besteht vorwiegend aus Dolomit (häufig braun dedolomitiert) sowie aus Quarz und Feldspat. Die Wackestone-Lagen zeigen eine Erosionsbasis und eine $\pm$ deutliche (normale) Gradierung. Die Grundmasse ist ein Mikrit, der sich mittels Anfärbung als Fe-I-Kalzit mit feinverteiltem Dolomit erweist.

Das Gestein zeigt keine Bioturbation. Schichtparallele Stylolithenbildung tritt gelegentlich auf. Dieser Mikrofaziestyp hat eine lagige Textur.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Dem Mikrofaziestyp 9 (sowie dem Mikrofaziestyp 8) entsprechen die von THIELE (1990: 16) als „plattige Kalke“ bezeichneten Sedimente des Unteren Muschelkalks am Nordrand der Rheinischen Masse sowie die von KLOTZ (1992: 42) beschriebenen „Plattenkalke“ aus dem Unteren Muschelkalk Hessens und Frankens.

Sedimentäres Environment und Genese: Eine ausführliche Diskussion erfolgt beim Mikrofaziestyp 7.

Vorkommen: Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks.

Mikrofaziestyp 10

(Tafel 6, Fig. 1)

FOLK-Klassifikation: Dismikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Mudstone.

Kurzbeschreibung: Es handelt sich um die sogenannten Gelbkalke, dunkelgelblich gefärbte mikritische Kalke, die im typischen Fall kleine Drusen enthalten. Es sind Dedolomite.

Beschreibung: Es handelt sich im typischen Fall um mikritische Kalke ohne auffällige Feinschichtung (Proben Nr.: B10, H1), es können aber auch mikritische Kalke sein, die im Gefüge weitgehend dem Mikrofaziestyp 8 entsprechen (z. B. Probe Nr. B13). Im letzteren Fall liegen undeutlich laminierte Kalke vor, die aus Mudstones mit dünnen Lagen detritischer Wackestones bestehen. Die Wackestone-Lagen bestehen aus Karbonat- und Silikat-Körnern. Der laterale Verlauf dieser Wackestone-Lagen ist gestört. Bei einem Teil läßt sich sicher erkennen, daß die Störung durch Erosionsprozesse erfolgte, in denen in schon abgelagertes Sediment kleine Rinnen gegraben wurden, die dann zusedimentiert wurden. In einem gewissen Umfang mögen die Störungen der Lamination aber auch auf Wühlspuren zurückführbar sein.

Obwohl das Gestein des Mikrofaziestyps 10 intensiv gelb bis gelbbraun gefärbt ist, erweist sich der Mikrit bei Anwendung der von FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) beschriebenen Färbemethode als Fe-I-Kalzit. Im Gestein treten immer wieder - ziemlich selten bis sehr häufig - Drusen auf. Mit zunehmender Häufigkeit nimmt auch die Größe der Drusen zu: Während in der Probe B13 Drusen von 1-2 mm Durchmesser gele-

gentlich bis mäßig häufig erscheinen, besitzen sie in der Probe H1 bis zu mehr als 10 mm Durchmesser, treten sehr häufig auf und bilden (zusammen mit nur kurz aushaltenden sparitverheilten Rissen) ein dreidimensionales Netzwerk. Die im Querschnitt unregelmäßig gerundeten Drusen sind durch die Lösung von Sulfaten entstandene Hohlräume. Am Rande kleiner und im peripheren Bereich großer Drusen erkennt man die Negativformen von Aggregaten aus dünn-tafelförmigen oder nadelförmigen Kristallen von 0,2-1 mm Länge und 0,02-0,1 mm Dicke. Diese Kristalle überkreuzen einander spitzwinkelig und/oder strahlen radial aus. Die Pseudomorphosen der Kristalle und die Drusen sind von einem blockigen Sparit aus Fe-I-Kalzit erfüllt; allerdings ist die Mitte der Drusen meist leer. Die ebenfalls von einem blockigen Sparit aus Fe-I-Kalzit erfüllten, kurz aushaltenden Risse der Probe H1 dürften auf Trocknungs- bzw. Schrumpfungsprozessen beruhen.

Es treten fließende Übergänge zum Mikrofaziestyp 8 auf, denn neben Vertretern des Mikrofaziestyps 8 mit gelber Färbung und vereinzelt Drusen gibt es auch Gelbkalke, die in allen Merkmalen dem Mikrofaziestyp 10 angehören, aber keine Drusen zeigen. Trotz dieser fließenden Übergänge unterscheidet sich der Mikrofaziestyp 10 vom Mikrofaziestyp 8 durch die intensiv gelbe bis gelbbraune Färbung, das Auftreten von Drusen und die Tendenz, keine Feinschichtung zu zeigen. Undeutlich laminierte Kalke wie B10 zeigen keine auffälligen dünnplattigen Absonderungsflächen, wie sie für (angewitterte) Proben der Mikrofaziestypen 8 und 9 charakteristisch sind. Außerdem ließen sich in Gesteinen des Mikrofaziestyps 10 keine Stylolithen beobachten.

Anmerkung: Dieser Mikrofaziestyp tritt im Probenkollektiv K nicht auf. Deshalb beruht seine Beschreibung auf den Proben Nr. H1, B10 und B13, die auch in den Kapiteln 4.3., 4.6.1. und 5.1. als Referenz für diesen Mikrofaziestyp behandelt werden. Die Probe H1 entstammt dem Probenkollektiv H (siehe Kap. 3.2.2.), während die Proben B10 und B13 dem Steinbruch im Botanischen Garten in Osnabrück entnommen wurden. Die lithostratigraphische Einstufung der beiden Proben läßt sich leicht in dem von LANGER (1989: Taf. 2, Profil 3 Westerberg [in dieser Arbeit abgebildet im Kap. 6.2.]) gegebenen Profil erkennen. Die Probe B10 wurde 1 m unterhalb der Untergrenze des Wellenkalk-2-Members entnommen und die Probe B13 4,4 m oberhalb der Untergrenze des Wellenkalk-2-Members.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: AS-SARURI & LANGBEIN (1990) stellen ausführlich vergleichbare Gelbkalke aus dem Unteren Muschelkalk Thüringens vor. Aus dem Unteren Muschelkalk Südost-Hessens und Mainfrankens werden vergleichbare Sedimente von KLOTZ (1992: 43-47) beschrieben. LUKAS (1991: 127-129, Taf. 1 Fig. 2) beschreibt unter der Bezeichnung „dolomitische Mudstones (Gelbkalke)“ sehr ähnliche Gesteine aus dem Unteren Muschelkalk Hessens, die sich vom Mikrofaziestyp 10 nur durch eine horizontale Feinschichtung aus gradierten quarzreichen Lagen, das seltene Auftreten von Intraklasten-Lagen und das Fehlen von Kalzit-Drusen unterscheiden. Der Beschreibung von LUKAS (1991) und einer vergleichbaren Beschreibung von THIELE (1990: 44 [Dolomikrite]) entsprechende Gesteine finden sich im Steinbruch im Botanischen Garten Osnabrück an der Basis der Gelbkalk-Horizonte und bilden dort den Übergang zwischen den Gesteinen des Mikrofaziestyps 8-9 und des Mikrofaziestyps 10 (siehe auch die Anmerkung zu Mikrofaziestyp 8).

Sedimentäres Environment und Genese: Die von Kalzit erfüllten Drusen im Mikrofaziestyp 10 werden von LUKAS (1991: 129), LANGER (1989: 14) und GROETZNER (1984: 164) als Sulfatresiduen interpretiert. Vergleichbare Strukturen in den „Gelben Basis-Schichten“ des Oberen Muschelkalks werten DUCHROW & GROETZNER (1984: 178, 179) zumindest zum Teil als „Gipsresiduen“.

Die großen Drusen der Probe H1 entsprechen den von MÜLLER (1988: 495-496) aus dem Supratidal rezenter Sebkhas beschriebenen Anhydrit-Knollen mit „Chicken-wire“-Struktur (vgl.: TUCKER & WRIGHT 1990: 147). FLÜGEL (1982: 558-560, Taf. 45 Fig. 1) beschreibt kleine kalzitisierte Anhydrit-Rosetten in einem feinkörnigen Dolomit (!) aus dem Intertidal oder Supratidal des Miozäns von Ägypten, die gut mit den kleinen Drusen der Proben B10 und B13 übereinstimmen. Demnach kann kein Zweifel mehr daran bestehen, daß die im Mikrofaziestyp 10 beobachteten Drusen Anhydrit-Residuen sind.

Die als Gelbkalke bekannten Horizonte intensiv gelb gefärbter Kalke werden in der Literatur durchgängig als Dedolomite (= in Kalzit umgewandelte Dolomite) gedeutet (siehe z. B.: LANGER 1989: 59-62; LUKAS & WENZEL 1988; THIELE 1990: 44; LUKAS 1991: 127; LUKAS 1992: 103; KLOTZ 1992: 43; SCHULZ 1972: 138-139; BACHMANN 1973: 56; AS-SARURI & LANGBEIN 1990). Die gelbe bis gelbbraune Färbung dieser Kalksteine wird auf die Ausscheidung des im Dolomit enthaltenen Fe^{2+} als Fe^{3+}OOH unter oxidierenden Bedingungen während der Dedolomitierung zurückgeführt (FÜCHTBAUER & RICHTER 1988: 417; LANGER 1989: 14, 59; LUKAS 1992: 96, 103; SCHULZ 1972: 138). Zwar ist der im Rahmen der geochemischen Untersuchungen festgestellte Magnesium-Gehalt im Probenkollektiv K durchgängig gering (siehe Kap. 4.6.2.), aber die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen förderten in entsprechenden Proben Dedolomitisierungs-Spuren zutage (siehe Kap. 4.5.). Wenn die Gelbkalke als Ergebnis einer Dedolomitisierung gedeutet werden, muß man von einer frühdiagenetischen Dolomitierung ausgehen - dafür spricht u.

a. die Horizontbeständigkeit der Gelbkalke (SCHULZ 1972; LANGER 1989; THIELE 1990: 83; ROSENFELD & THIELE 1992: 498-499) und das Auftreten von Gelbkalk-Geröllen in Aufarbeitungshorizonten des Unteren Muschelkalks (NADJAFI 1979: 42-45). In der Literatur wird durchgängig eine frühdiagenetische Dolomitisierung der Gelbkalke angenommen (NADJAFI 1979: 43; LUKAS & WENZEL 1988; AS-SARURI & LANGBEIN 1990; THIELE 1990: 83; LUKAS 1991: 129; LUKAS 1992: 102, 104).

Da frühdiagenetische Dolomitisierung typisch für das hohe Intertidal und das Supratidal arider Gebiete ist und sich in dieses Ablagerungsmilieu auch sehr gut Sulfatresiduen einfügen (siehe z. B.: MCKENZIE 1991: 47-49; AS-SARURI & LANGBEIN 1990: 1014; MÜLLER 1988: 493-499; FLÜGEL 1982), folge ich LUKAS (1988: 118; 1991: 129) und AS-SARURI & LANGBEIN (1990: 1013-1014) darin, dieses Milieu als Bildungsraum für die Gelbkalke anzunehmen.

V o r k o m m e n : Mehrere Leithorizonte im Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Er findet sich auffällig selten als Mauerstein in Osnabrück.

Mikrofaziestyp 11

(Tafel 7, Fig. 1)

F O L K - K l a s s i f i k a t i o n : Intrabiosparrudit.

D U N H A M - K l a s s i f i k a t i o n : Rudstone aus Intraklasten und Bioklasten.

K u r z b e s c h r e i b u n g : In einem sparitischen Blockzement befinden sich $\pm$ eckige Partikel von bis zu mehr als 30 mm Durchmesser. Die Partikel sind Intraklasten, Riffbildner-Skelette und Echinodermen-Reste (soweit identifizierbar: Trochiten).

B e s c h r e i b u n g : Es handelt sich um Rudstones, die ziemlich schlecht bis sehr schlecht sortiert sind. Die kleinsten Partikel haben 0,1 mm Durchmesser, während die größten mehr als 30 mm Länge erreichen. Der Median der Korngröße beträgt ca. 2 mm. Eine Gradierung oder Schichtung läßt sich in den Dünnschliffen des Mikrofaziestyps 11 nicht beobachten. Im Dünnschliff P15 handelt es sich um eine Lage, auf die nach oben der Mikrofaziestyp 12 folgt.

Eine wichtige Gruppe der Partikel sind die Bioklasten: Abgerollte und/oder zerbrochene Echinodermen-Reste - die, soweit sie identifizierbar sind, sich immer als Trochiten zu erkennen geben - und Riffbildner-Fragmente treten häufig auf, während sich Brachiopoden-Fragmente gelegentlich finden lassen. Die Riffbildner-Fragmente entstanden hauptsächlich aus den Skeletten der ästigen Stromatopore *Amphipora* und unidentifizierbarer Stromatoporen, seltener aus den Skeletten von tabulaten Korallen und Bryozoen. Daneben finden sich auch nicht mehr bestimmbare Riffbildner-Fragmente. Allgemein gilt, daß die Biogene gelegentlich Mikritrinden und Spuren von Anbohrung zeigen. Neben den Bioklasten treten als zweite wichtige Partikel-Gruppe die Intraklasten auf, die mit bis zu mehr als 30 mm Länge auch die größten Partikel umfassen. Die Intraklasten sind entweder bioklastische Wacke- bis Packstones oder gehören dem Mikrofaziestyp 13 an. Während die großen Intraklasten kantengerundet sind, sind die anderen Partikel überwiegend eckig und untergeordnet kantengerundet. Im Dünnschliff P15 ist die Sortierung sehr schlecht und es herrschen Intraklasten vor; demgegenüber dominieren im etwas besser sortierten Rudstone von R8 Riffbildner-Fragmente und Echinodermen-Reste zusammen. Peloiden lassen sich nur sehr selten beobachten.

Die Partikel bestehen aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis Fe-I-Kalzit [Bestimmung durch die Färbung nach FÜCHT-BAUER & RICHTER (1988: 241)]. Eine mikritische Matrix ließ sich nicht nachweisen. Der Zement ist ein grober, blockiger Sparit aus Fe-I-Kalzit, der um die Echinodermen-Reste syntaxial gewachsen ist. In P15 ist der Zement durch nachträgliche Kornverkleinerung feinkristalliner und trüber geworden. Diese Kornverkleinerung dürfte mit einer stellenweise beobachtbaren Dolomitisierung (durch eisenreiche Dolomite) und Verkieselung zusammenhängen. Dolomitisierung und Verkieselung treten wolfig-diffus in fleckenhaften Bereichen auf und gehen anscheinend bevorzugt von Partikeln mit mikritischen Säumen oder mikritischen Partien aus. Daß die Kornverkleinerung auf diagenetische und nicht auf verwitterungsbedingte Prozesse zurückzuführen ist, zeigen einzelne mit Sparit aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis Fe-II-Kalzit verheilte Risse, die den Bereich mit Kornverkleinerung, Dolomitisierung und Verkieselung durchschlagen, ohne von diesen Prozessen betroffen zu sein.

A n m e r k u n g : Da dieser Mikrofaziestyp im Probenkollektiv P nur mit einem Dünnschliff (P15) repräsentiert ist, wurde bei der Beschreibung auch die Probe R8 berücksichtigt, die in dem Steinbruch entnommen wurde, aus dem das Probenkollektiv P stammte (siehe Kap. 4.3.2.). In einzelnen Bänken im Beisinghäuser Kalk ließ sich beobachten, daß über einer dünnen mergeligen Lage, die die Bankfuge bildet, mit scharfer Grenze an der Basis eine mehrere Zentimeter dicke Lage des Mikrofaziestyps 11 folgt, aus der sich nach

oben - mit $\pm$ fließender Abnahme des maximalen Korndurchmessers - der Mikrofaziestyp 12 entwickelt. Diese Gradierung läßt sich zwar in durchgesägten Mauersteinen erkennen, ist aber in Dünnschliffen nur schwer nachvollziehbar, da das Format der Dünnschliffe dafür schon zu klein ist (siehe Kap. 2.5.).

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Auch EBERT & MÜLLER (1973: 101-102) beobachteten im Beisinghäuser Kalk von Eslohe-Reiste grobkonglomeratische Bänke; sie geben an, daß die Gerölle (= Intraklasten) maximal 15 cm Durchmesser haben, und deuten die Kalksteine des Beisinghäuser Kalks als Turbidite. GAUGLITZ (1967), der im Rahmen seiner Untersuchung des Flinz im nordöstlichen Sauerland den Beisinghäuser Kalk in den auch von mir beprobten Steinbrüchen in Profilen aufnahm, unterschied zwar keine Mikrofaziestypen, interpretierte aber die Kalkstein-Bänke im Flinz durchgängig als Turbidite (siehe GAUGLITZ 1967: 23, 49ff.). MACHEL (1990: 55, Taf. 3/D, 4/A) beschreibt aus dem Vorriff-Bereich des Briloner Riffs den Mikrofaziestyp 11 ähnliche Crinoiden-Stromatoporen-Floatstones und -Grainstones. Ein Teil der von MACHEL & HUNTER (1994: 164) in die „Zone III“ des Vorriffes devonischer Riffe eingeordneten Kalksteine stimmt mit dem Mikrofaziestyp 11 überein. Recht gut vergleichbar mit dem Mikrofaziestyp 11 ist die von STRITZKE (1989: 89, Taf. 3 Fig. 1-2; 1990: 271, Taf. 3 Fig. 1-2) aus dem Mittel- und Oberdevon des Briloner Vorriffbereichs beschriebene „arenitische Korallen-Stromatoporen-Fazies“, die sich vom Mikrofaziestyp 11 durch die häufigeren und größeren Riffbildner-Bruchstücke sowie das Fehlen von Intraklasten unterscheidet. STRITZKE (1989: 89; 1990: 271) nimmt eine Sedimentation der „arenitischen Korallen-Stromatoporen-Fazies“ aus Schuttströmen (= „debris flows“) an.

Ähnlich wie im lagunären Massenkalk von Brilon (MAY 1987: 57) enthalten die Rudstones des Mikrofaziestyps 11 im allgemeinen mehr Intraklasten als die Grainstones des Mikrofaziestyps 12. Von RACKI (1993: 181, Abb. 12B, 16F) als Mikrofazies L-1 aus dem lagunären Devon des Heilig-Kreuz-Gebirges beschriebene Grain- und Rudstones unterscheiden sich durch das häufige Auftreten von Fragmenten der ästigen Stromatopore *Stachyodes* vom Mikrofaziestyp 11.

Sedimentäres Environment und Genese: Mikritrinden können als Hinweis auf flaches, gut durchlichtetes Meereswasser gewertet werden (FLÜGEL 1982: 128, 160-163). Der Haupt-Lebensraum von *Amphipora* war das flache Wasser des lagunären Milieus (bzw. „back reef“) (siehe z. B.: KREBS 1974: 178; FLÜGEL & HÖTZL 1976: 28; MAY 1988: 183-184, 187-188; ISAACSON & GALLE 1991; RACKI 1993: 111; SCHUDACK 1993: 94, 97). Trotz dieser Flachwasserindikatoren handelt es sich um eine Beckenablagerung; denn die in größeren Stücken sichtbaren sedimentologischen Merkmale (Gradierung, Ton- bis Mergelstein im Liegenden, Mikrofaziestyp 12-14 im Hangenden) erweisen diesen Mikrofaziestyp als den unter der größten Wasserenergie abgelagerten Teil von ($\pm$ proximalen) Kalkturbiditen (vgl. z. B.: MEISCHNER 1964; FLÜGEL 1982: 508-516; McILREATH & JAMES 1984; EINSELE 1991; EBERLI 1991). Desweiteren läßt sich daraus schließen, daß diese Turbidite aus Suspensionsströmen mit ziemlich großer Dichte sedimentiert wurden (EBERLI 1991: 345-346). Die Intraklasten dürften zumindest zum Teil aus wiederaufgearbeiteten Teilen älterer Turbidite stammen.

Im Rahmen seiner Untersuchung von riffnahen Kalkturbiditen - die er als „allodapische Kalke“ bezeichnete - berücksichtigte MEISCHNER (1964: 163, 180) auch die devonischen Flinkalke des Sauerlandes und interpretierte in diesem Zusammenhang den Beisinghäuser Kalk von Beisinghausen-Reiste als Abfolge ziemlich proximaler Turbidite, die nicht weit entfernt von dem Detritus liefernden Massenkalk-Riff entstanden.

Vorkommen: Beisinghäuser Kalk des höchsten Mitteldevons bis tiefsten Oberdevons. Nach den Beobachtungen im Probenkollektiv P und den untersuchten Aufschlüssen zu urteilen, bildet dieser ziemlich seltene Mikrofaziestyp relativ dünne Lagen.

Mikrofaziestyp 12 (Tafel 6, Fig. 4; Tafel 7, Fig. 2)

FOLK-Klassifikation: Gut ausgewaschener Biosparit.

DUNHAM-Klassifikation: Grainstone aus Bioklasten und anderen Partikeln.

Kurzbeschreibung: Grainstone aus $\pm$ locker gepackten, eckigen bis gut gerundeten Körnern (Median der Korngröße: 0,25-0,45 mm), zwischen denen sich kein Mikrit befindet. Die häufigsten Partikel sind Bioklasten (überwiegend Echinodermen-Reste), an zweiter Stelle folgen Lumps.

Beschreibung: Dieser gut ausgewaschene Grainstone besteht aus $\pm$ locker gepackten Partikeln von 0,08-1,3 mm Durchmesser. Der Median der Korngröße schwankt je nach Dünnschliff zwischen 0,25 mm und 0,45 mm, die Sortierung zwischen ziemlich gut und schlecht und die Kornform zwischen gut gerundet und eckig. Während in einigen Proben die Partikel völlig homogen verteilt sind, tritt in anderen, durch fließende

Übergänge damit verbundenen Proben eine undeutliche Feinschichtung auf. Diese undeutliche Feinschichtung ist eine Differenzierung in Lagen, die etwas gröber und solche, die etwas feiner sind. Diese 3-12 mm dicken Lagen sind nicht scharf gegen einander begrenzt, sondern gehen fließend in einander über. Diese Feinschichtung schlägt sich nie in der Ausbildung von Schicht- oder Absonderungsflächen nieder. Insgesamt gesehen sind die Dünnschliffe mit $\pm$ homogener Textur häufiger als die mit feinlagiger Textur.

Folgende Partikel-Typen lassen sich beobachten:

- Echinodermen-Reste. Sie sind häufig und entstanden (soweit noch beurteilbar) aus Trochiten.
- andere Bioklasten. Neben den Echinodermen-Resten treten $\pm$ ziemlich häufig andere Bioklasten auf, die - soweit noch ihre Herkunft erkennbar sind - aus Skeletten von Brachiopoden, Muscheln, tabulaten Korallen, Stromatoporen und Bryozoen entstanden.
- Biomorpha. Ziemlich selten bis häufig finden sich identifizierbare Mikrofossilien: Am häufigsten sind die Calcisphaeren, die durch *Radiosphaera* sp. (ziemlich häufig) und verschiedene Typen nicht-radiosphaerider Calcisphaeren (ziemlich häufig) vertreten sind. Den Foraminiferen lassen sich neben sehr seltenen mehrkammerigen Formen (*Nanicella* sp., *Multiseptida* sp.) auch die einkammerigen Formen *Parathurammina* ex gr. *dagmarae* SULEYMANOV 1945 (ziemlich selten), *Parathuramminites stellata* (LIPINA 1950) (selten), *Irregularina* sp. (ziemlich selten), *Bisphaera elegans* VISSARIONOVA 1950 (ziemlich selten), *Archaeosphaera* sp. (selten), *Cribrosphaeroides* sp.? (selten) sowie *Vicinesphaera* sp. (stellenweise gehäuft) zuordnen. Die Kalkalgen werden durch die Grünalgen *Flabellia ufensis* SHUYSKY 1973 (ziemlich selten) und *Vermiporella myna* WRAY 1967 (selten) sowie durch unbestimmbare Fragmente repräsentiert. Darüber hinaus finden sich einzelne Ostracoden-Schalen ($\pm$ selten) sowie Tentaculiten (in einzelnen Dünnschliffen und selten, nur im Dünnschliff P18 gehäuft). Desweiteren lassen sich Fragmente der röhrenförmigen Mikroproblematika *Moravamina* sp. (ziemlich selten), *Jansaella ridingi* MAMET & ROUX 1975 [= *Uraloporella variabilis* sensu RIDING & JANSÁ] (selten) und *Proninella* sp. (selten) beobachten, deren Deutungen als Kalkalgen oder Foraminiferen umstritten sind (siehe RIDING & JANSÁ 1974, 1976; MAMET & ROUX 1975, 1983; LOEBLICH & TAPPAN 1988; VACHARD 1988; RACKI & SOBON-PODGÓRSKA 1993).
- Intraklasten mikritischer Kalke. In grobkörnigen Vertretern des Mikrofaziestyps 12 lassen sich Intraklasten aus bioklastischen Wackestones und anderen Typen mikritischer Kalke ziemlich häufig identifizieren. Demgegenüber sind in feinkörnigen Kalken sichere Nachweise ziemlich selten, da kleine gerundete Intraklasten nur sehr schwer von Lumps unterscheidbar sind.
- Lumps. Die als Lumps bezeichneten gerundeten, $\pm$ unregelmäßigen Körner aus Mikrit mit sparitischen Bereichen oder Flecken treten häufig auf. Im allgemeinen wird die Entstehung von Lumps durch die Mikritisierung von Grapestones, bzw. durch eine größere Menge von Mikritzement erklärt (FLÜGEL 1982: 126, 135-136; TUCKER & WRIGHT 1990: 11-12). Obwohl man davon ausgehen kann, daß dieses im wesentlichen auch für die Lumps aus dem Beisinghäuser Kalk gilt, muß m. E. damit gerechnet werden, daß ein Teil der Lumps durch die Anbohrung und Mikritisierung von Bioklasten gebildet wurde - als Vorstufe zu Bahamitpeloiden (vgl. FLÜGEL 1978: 95, 107; FLÜGEL 1982: 125, 134-135; TUCKER & WRIGHT 1990: 11) (siehe auch Mikrofaziestyp 13). Möglicherweise entstand ein Teil der Lumps durch die Fragmentierung, Anbohrung und Mikritisierung von Exemplaren des Mikroproblematikums *Renalcis* (siehe MAMET & ROUX 1983: 88-95, Taf. 11-13); denn es fanden sich *Renalcis*-artige Reste, die aber zu einer sicheren Zuordnung zu schlecht erhalten waren (siehe MAY 1994a: 203; 1994e: 17). Als weitere Möglichkeit der Entstehung von Lumps führt EBERLI (1991: 341) die Wiederaufarbeitung teilweise verfestigten Karbonatschlammes des Vorriffs an.
- „mikritische Körner“. Insbesondere in den feinkörnigen Varietäten finden sich häufig im Durchlicht dunkle Partikel, die zu klein sind, um entscheiden zu können, ob es sich um weitgehend mikritisierte Bioklasten, Lumps oder Intraklasten handelt. Die Bezeichnung „Peloide“ sollte für sie vermieden werden, da die „mikritischen Körner“ unregelmäßig gerundet sind und meist im Durchlicht hellere Partien (= sparitische Bereiche) enthalten. Die „mikritische Körner“ sind für „Pseudopellets“ sensu FÄHRÆUS et al. (1974) zu groß. Kotpillen wurden nie gefunden.

Dünnschliff Nr.:	P 1	P 28
häufigste Partikel	Echinodermen-Reste	„mikritische Körner“
Median der Korngröße	0,45 mm	0,25 mm
Kornform	eckig bis kantengerundet	meist kanten- bis gut gerundet
Sortierung	schlecht	ziemlich gut

Bezüglich Partikelzusammensetzung, Korngröße und -form sowie Sortierung lassen sich als Extremtypen die Proben P1 (Taf. 7 Fig. 2) und P28 (Taf. 6 Fig. 4) einander gegenüberstellen. Allerdings sind beide durch fließende Übergänge miteinander verbunden, und die meisten Dünnschliffe stehen zwischen den Extrema.

Trotz dieser Spannweite zeigen alle dem Mikrofaziestyp 12 zugeordneten Dünnschliffe folgende wichtige Gemeinsamkeiten: Die Partikel sind $\pm$ locker gepackt, es tritt nie mikritische Matrix auf, es gibt immer eckige Partikel (sehr häufig bis gelegentlich) und Echinodermen-Reste sind häufig bis sehr häufig. In mehreren Dünnschliffen läßt sich ein fließender Übergang zum Mikrofaziestyp 14 beobachten, der sich (nur) durch seine mikritische Matrix und dichtere Packung der Partikel unterscheidet.

Die Karbonatfärbung nach FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) zeigt, daß die Partikel aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis Fe-I-Kalzit bestehen, und daß der Zement aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis Fe-I-Kalzit - seltener aus Fe-II-Kalzit - aufgebaut wird. Der Zement ist immer ein blockiger Sparit; Rasenzemente wurden nie beobachtet. An der gleichartigen Richtung der Auslöschung und den durchlaufenden Druckzwillingslamellen läßt sich erkennen, daß oft der Zement, der einen Echinodermen-Rest umgibt, mit dem Echinodermen-Rest einen Einkristall bildet (= syntaxialer Zement). Es gibt mehrere Generationen sparitverheilten Risse, die einander versetzen und an ihren unterschiedlichen Eisengehalten (bis zu Fe-III-Kalzit) erkennbar sind. Die sparitverheilten Risse sind älter als die gelegentlich auftretenden Stylolithen, da die Stylolithen sie durchschlagen.

In vielen Dünnschliffen läßt sich eine Kornverkleinerung des Sparitzementes beobachten. Sie erweist sich als diagenetisch, da sich oft feststellen läßt, daß die Sparitfüllung hindurchlaufender Risse nicht davon betroffen ist. Wo diese Kornverkleinerung besonders intensiv ist, zeigt die Karbonat-Färbemethode eisenhaltigen Dolomit, der wolkig verteilt in Kristallen von ca. 0,005-0,05 mm Größe auftritt. In diesen Bereichen läßt sich außerdem eine Verkieselung mit Flecken und zerstreuten idiomorphen Tief-Quarzen von 0,03-0,3 mm Größe beobachten. Im Dünnschliff P2 finden sich sogar primär idiomorphe Tief-Quarze, die jetzt durch einen feinkristallinen eisenhaltigen Dolomit ersetzt sind. Verkieselung in Form von Gruppen idiomorpher Quarze ist allerdings nicht auf die Zonen kornverkleinerten Zementes beschränkt; sie tritt allgemein häufiger in mikritischen Partikeln als im Sparitzement auf. [Spätdiagenetische idiomorphe Tief-Quarze, die sich mit den im Beisinghäuser Kalk verbreiteten vergleichen lassen, beschreiben aus dem Massenkalk z. B. SCHNEIDER (1977: 32-33) und MAY (1987: 56). SCHNEIDER (1977: 38) erwähnt auch die Verdrängung dieser Tief-Quarze durch Dolomit.]

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Unter den von PREAT & MAMET (1989) innerhalb der Sedimente der franco-belgischen Karbonatplattform des Givetiums differenzierten 13 Mikrofaziestypen ist nur der Mikrofaziestyp 2, der in offen-marinem Flachwasser oberhalb der Wellenbasis entstand, ziemlich gut mit meinem Mikrofaziestyp 12 vergleichbar (PREAT & MAMET 1989: 51-52, Taf. 2). Weniger gut vergleichbar ist ein großer Teil der von MAY (1987: 56-57, Abb. 3) aus dem lagunären Massenkalk von Brilon beschriebenen Grainstones, da dort neben Echinodermenschutt-Grainstones auch Typen wie der von MAY (1987: Abb. 3) abgebildete Grainstone mit auffällig vielen Muschelschalen-Fragmenten auftreten.

Zum Vergleich bietet sich die „light-gray crinoid-brachiopod facies“ an, die KREBS (1974: 198, Abb. 22-6) dem tieferen Bereich des Vorriff-Hanges zuordnet. Nur durch die relativ dichte Packung der abgebildeten Probe weicht die von STRITZKE (1989: 89-90, Taf. 3 Fig. 4; 1990: 272, Taf. 3 Fig. 4) aus dem Mittel- und Oberdevon des Briloner Vorriffbereichs beschriebene „komponentenarme Arenitfazies“ vom Mikrofaziestyp 12 ab. STRITZKE (1989: 90; 1990: 272) interpretiert diesen Mikrofaziestyp als Kalkturbidite, die in mehreren hundert Metern Wassertiefe entstanden.

Sedimentäres Environment und Genese: Die Merkmale dieses Mikrofaziestyps sind auf den ersten Blick zwiespältig; auf der einen Seite weisen zahlreiche Partikel auf ein sehr flaches marines Milieu hin, auf der anderen Seite finden sich Merkmale tiefmarin gebildeter Kalke:

Lumps sind gute Indikatoren für Flachwasser, denn sie werden im allgemeinen in subtidalen und intertidalen Flachwassergebieten (mit herabgesetzter Zirkulation) bis etwa 10 m Tiefe gebildet (FLÜGEL 1978: 108-109; 1982: 135-136). Häufige und wichtige Faziesfossilien für geschützte marine Flachwasserbereiche - insbesondere lagunäre Sedimente (bzw. „Back reef“-Sedimente) - sind im Mittel- und Oberdevon die auch im Massenkalk des Sauerlandes verbreiteten Calcisphaeren (siehe z. B.: FLÜGEL & HÖTZL 1971: 373-379, 386; KREBS 1974: 178; FLÜGEL 1978: 279; MAMET & PREAT 1987: 448; MAY 1988: 180, 186; PREAT & MAMET 1989: 64; VACHARD 1993: 65; RACKI & SOBON-PODGÓRSKA 1993: 284). Die einkammerigen Foraminiferen *Parathuramina*, *Irregularina*, *Bisphaera* und *Cribrosphaeroides* sind im hohen Mittel- und Oberdevon typische Elemente mariner Karbonate des flachen Subtidals mit $\pm$ deutlichem „Back reef“-Charakter oder lagunärem Charakter (siehe z. B.: TOOMEY et al. 1970; FLÜGEL & HÖTZL 1971; NEUMANN et al. 1975; PREAT & MAMET 1989: 64; Taf. 6, VACHARD 1993: 65; RACKI & SOBON-PODGÓRSKA 1993: 266-268, 284). Darüber hinaus sind *Parathuramina*, *Vicinesphaera*, *Bisphaera*, *Archaesphaera* und

Cribrosphaeroides aus Kalksteinen mit lagunärem Charakter im devonischen Massenkalk des Sauerlandes bekannt (siehe: FLÜGEL & HÖTZL 1971: 365-372; MAY 1988: 180). Die bisher bekannten Vorkommen des Mikroproblematikums *Jansaella* liegen in flachem Subtidal mit $\pm$ deutlichem „Back reef“-Charakter (RIDING & JANSÁ 1974, 1976; MAMET & ROUX 1975). *Nanicella*, *Proninella* und *Vermiporella* sind ebenfalls als Anzeiger für flaches Subtidal verwertbar (siehe z. B.: MAMET & PREAT 1987; GALLE et al. 1988: 640; MAY 1992; RACKI & SOBON-PODGÓRSKA 1993). Demgegenüber sind Tentaculiten (Taf. 6 Fig. 4) für das rifferne Becken charakteristisch (siehe z. B. KREBS 1974: 178).

Die Berücksichtigung der Einbettung dieses Mikrofaziestyps in die gesamte Schichtenfolge (siehe Mikrofaziestyp 11) klärt die scheinbaren Widersprüche: Es handelt sich um Kalkturbidite, wie es schon MEISCHNER (1964), GAUGLITZ (1967) und EDER et al. (1983) erkannten. Die flachmarinen bis lagunären Partikel sind Detritus aus den lagunären Bereichen, die den größten Teil der Massenkalk-Plattformen aufbauen; der Echinodermenschutt stammt aus den sogenannten „Riffkernen“ am oberen Ende des beckenwärts gerichteten Abhanges der Karbonat-Plattformen (MAY 1987: 71) und benachbarten Crinoiden-„Wäldern“; und die Tentaculiten schließlich repräsentieren die Fauna des Beckens, in dem die Sedimentation erfolgte. Der Mikrofaziestyp 12 ist bei geringerer Wasserenergie als der Mikrofaziestyp 11 und bei größerer Wasserenergie als die Mikrofaziestypen 13 und 14 abgelagert worden.

V o r k o m m e n : Beisinghäuser Kalk des höchsten Mitteldevons bis tiefsten Oberdevons.

Mikrofaziestyp 13

(Tafel 7, Fig. 3)

F O L K - K l a s s i f i k a t i o n : Biopelsparit.

D U N H A M - K l a s s i f i k a t i o n : Feinkörniger Grainstone.

K u r z b e s c h r e i b u n g : Das Gestein unterscheidet sich vom Mikrofaziestyp 12 durch die kleineren Körner (Median der Korngröße: 0,15 mm) und die größere Häufigkeit von Lumps und Peloiden.

B e s c h r e i b u n g : Der Mikrofaziestyp 13 ist ein Grainstone aus überwiegend kantengerundeten, untergeordnet gut gerundeten oder eckigen Partikeln, deren Durchmesser 0,05-0,7 mm beträgt (Median der Korngröße: 0,15 mm). Die Sortierung der Partikel ist ziemlich gut bis gut und besser als im Mikrofaziestyp 12. In den Dünnschliffen ist eine undeutlich erkennbare Abfolge aus wenige Millimeter dicken Lagen, die etwas feiner (bzw. gröber) sind, entwickelt. Die Unterschiede zwischen den Lagen sind aber nur sehr gering und fließend, außerdem manifestieren sie sich nicht in der Ausbildung von Schicht- oder Absonderungsflächen.

Unter den Partikeln sind die Lumps und andere „mikritische Körner“ zusammen häufiger als die Bioklasten. Viele der „mikritischen Körner“ sind sicher Lumps, aber nicht wenige sind so homogen mikritisch und gerundet, daß sie den Charakter typischer Pelioide erlangen. Dazwischen gibt es fließende Übergänge, so daß die Bezeichnung Bahamitpelioide (vgl. FLÜGEL 1978: 95, 107; FLÜGEL 1982: 125, 134-135; TUCKER & WRIGHT 1990: 11) gerechtfertigt wäre. Kotpillen wurden nie gefunden. Sichere Intraklasten sind ziemlich selten; alle beobachteten bestanden aus bioklastischen Mikriten.

Der überwiegende Teil der Bioklasten ist Echinodermen-Schutt; Schalenreste und andere Bioklasten spielen eine untergeordnete Rolle. Gelegentlich bis ziemlich häufig finden sich Calcisphaeren und stellenweise gehäuft *Vicinesphaera* sp. Im Vergleich zu den feinkörnigen Varianten des Mikrofaziestyps 12 ist beim Mikrofaziestyp 13 das Spektrum der Bioklasten und Biomorpha monotoner und die Häufigkeit von Lumps und Peloiden deutlich größer.

Eine mikritische Matrix tritt nicht auf. Während sich die Mineralogie der Partikel nur zwischen ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit und Fe-I-Kalzit bewegt, reicht der aus blockigem Sparit aufgebaute Zement von ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis zu Fe-II-Kalzit. Auch bei diesem Mikrofaziestyp wurde stellenweise im Zement Kornverkleinerung beobachtet. Außerdem treten diffuse Verkieselungen mit idiomorphen Tief-Quarzen von bis zu 0,4 mm Länge auf, die stellenweise gehäuft, meist aber sehr zerstreut sind.

Es lassen sich verschiedene Generationen sparitverheilten Risse unterscheiden, wobei in die späteren eisenreicherer Sparitzement (Fe-III-Kalzit) abgeschieden wurde. Der Dünnschliff P17 zeigt, daß ein Teil der sparitverheilten Risse älter als die Entstehung der Quarze ist, da sich ein in der Sparitfüllung eines Risses gewachsener Tief-Quarz beobachten ließ. Die Styolithen sind jünger als die sparitverheilten Risse.

Von den drei diesem Mikrofaziestyp zugeordneten Dünnschliffen zeigen zwei einen scharfen, erosiven Kontakt zum Mikrofaziestyp 12, während in einem (P12) ein fließender Übergang auftritt. Der Mikrofaziestyp 13 ist dem Mikrofaziestyp 12 gut vergleichbar und unterscheidet sich am deutlichsten durch Korngröße und Partikelzusammensetzung. Trotz der weitgehenden Ähnlichkeiten zum Mikrofaziestyp 12 - insbesondere dessen feinkörnigeren Varietäten - gibt es einen Sprung, der die Abtrennung rechtfertigt.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Abgesehen von den Mikrofazies-Beschreibungen in der Literatur, die zum Vergleich mit dem Mikrofaziestyp 12 herangezogen werden, fanden sich keine vergleichbaren Mikrofaziestypen.

Sedimentäres Environment und Genese: Es gilt dasselbe wie für den Mikrofaziestyp 12. Allerdings kann man aufgrund der geringeren Korngröße davon ausgehen, daß der Mikrofaziestyp 13 bei geringerer Wasserenergie als der Mikrofaziestyp 12 abgelagert wurde.

Vorkommen: Beisinghäuser Kalk des höchsten Mitteldevons bis tiefsten Oberdevons.

Mikrofaziestyp 14

(Tafel 7, Fig. 4)

FOLK-Klassifikation: Schlecht ausgewaschener Biosparit bis Biomikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Packstone aus Bioklasten und anderen Partikeln.

Kurzbeschreibung: Dieses Gestein unterscheidet sich vom Mikrofaziestyp 12 nur dadurch, daß die Zwickel zwischen den dicht gepackten Partikeln teilweise bis vollständig von Mikrit erfüllt sind. Der Median der Korngröße beträgt 0,27-0,3 mm.

Beschreibung: Konstitutives Element des Mikrofaziestyps 14 sind eckige bis gerundete, mäßig dicht bis dicht gepackte, ziemlich schlecht bis ziemlich gut sortierte Partikel von 0,08-1,4 mm Durchmesser. Der Median der Korngröße schwankt zwischen 0,27 mm und 0,3 mm. Echinodermen-Reste und „mikritische Körner“ sind vergleichbar häufig; beide Gruppen zusammen stellen 80-90 % der Partikel. Darüber hinaus finden sich andere Bioklasten - insbesondere Schalenreste lassen sich $\pm$ gelegentlich identifizieren, Bryozoenreste sind ziemlich selten. An Biomorpha treten gelegentlich bis häufig Calcisphaeren und die einkammerige Foraminifere *Vicinesphaera* sp. auf. Andere Foraminiferen und *Vermiporella myna* WRAY 1967 sind selten. Ziemlich selten bis ziemlich häufig beobachtet man Tentaculiten, und Ostracoden sind ziemlich selten. Die „mikritischen Körner“ sind aufgrund der dichteren Packung und der mikritischen Matrix nicht mehr so gut identifizierbar wie in den Mikrofaziestypen 12 und 13, aber es gilt im Mikrofaziestyp 14 prinzipiell dasselbe wie dort: Der größte Teil sind sichere Lumps.

Die Zwickelhohlräume zwischen den Partikeln sind in unterschiedlichem Umfange von Mikrit erfüllt: z. T. vollständig (= Biomikrit), aber in den meisten Fällen nur teilweise (= schlecht ausgewaschener Biosparit). Mikritische Matrix und Partikel bestehen aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis Fe-I-Kalzit. Die Zusammensetzung des Zementes, der immer ein blockiger Sparit ist, reicht von ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis zu Fe-II-Kalzit. Allerdings sind die syntaxialen Zemente um Echinodermen-Reste meist eisenärmer als die umgebenden Zemente, was sich als Hinweis auf die frühdiagenetische Bildung der syntaxialen Zemente interpretieren läßt. [Auch SCHNEIDER (1977: 31) nimmt eine relativ frühe Bildung dieser syntaxialen Zemente an.]

Ziemlich weit verbreitet im Mikrofaziestyp 14 ist die Ausbildung bis zu 0,3 mm langer, idiomorpher bis hypidiomorpher Tief-Quarze, die zerstreut (bevorzugt in den mikritischen Partien) gesproßt sind. Diese Verrieselung ist fleckenweise gehäuft. Neben den Tief-Quarzen treten im Dünnschliff P8 bis zu 0,4 mm große, rhomboedrische Dolomit-Kristalle auf, die im Gestein zerstreut gewachsen sind. In diesem Mikrofaziestyp beobachtet man ziemlich selten bis ziemlich häufig sehr feine, $\pm$ schichtparallele, nur kurz aushaltende Stylolithen, deren Häufigkeit im Gestein anscheinend zusammen mit der Häufigkeit von Mikrit zunimmt. Es lassen sich mehrere Generationen sparitverheilte Risse unterscheiden.

Die Kombination aus dichter Packung der Partikel und dem Auftreten von mikritischer Matrix charakterisiert dieses Gestein als Packstone und unterscheidet es vom Mikrofaziestyp 12. Fast alle Dünnschliffe des Mikrofaziestyps 14 zeigen fließende Übergänge zum Mikrofaziestyp 12.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Den unbefriedigenden Beschreibungen in EBERT & MÜLLER (1973: 102-103) nach zu urteilen, gehören die dort vorgestellten Proben 1-2 aus dem Beisinghäuser Kalk von Eslohe-Reiste dem Mikrofaziestyp 14 an. Die von HLADIL (1986: 6; 1988: 612; 1994a: 311, 318) aus dem Frasnium von Mähren beschriebene Mikrofazies-Assoziation I, die auf dem schwach geneigten Hang unterhalb des Plattform-Randes sedimentiert wurde, stimmt in wesentlichen Charakteristika mit dem Mikrofaziestyp 14 überein. Eine gewisse Ähnlichkeit zeigt der von HERBIG & BENDER (1992: 250-251, Taf. 50 Fig. 3, 6-11, Taf. 51 Fig. 5) beschriebene Mikrofaziestyp A1, der sich durch seine deutlich geringere Korngröße (maximal 0,1-0,4 mm) vom Mikrofaziestyp 14 unterscheidet und den größten Mikrofaziestyp in Turbiditen der Gladenbach-Formation (Unterkarbon, östliches Rheinisches Schiefergebirge) darstellt. Mit dem Mikrofaziestyp 14 stimmt die von STRITZKE (1989: 89, Taf. 3 Fig. 3; 1990: 271-272, Taf. 3 Fig. 3) aus dem Mittel- und Oberdevon des Briloner Vorrißbereichs beschriebene und als Turbidite gedeutete „schwach ausgewaschene Crinoidenfazies“ sehr gut über-

ein. Mit dem Mikrofaziestyp 14 übereinstimmende Kalksteine ordnen MACHEL & HUNTER (1994: 164) in die „Zone II“ des Vorriffs devonischer Riffe ein. Unter den Standardmikrofaziestypen von WILSON (1975: 63-69) bietet sich zum Vergleich besonders gut Nr. 4 an, der für den Hangabfall (= „fore-slope“) charakteristisch ist (vgl. FLÜGEL 1982: 406).

Sedimentäres Environment und Genese: Ebenso wie beim Mikrofaziestyp 12 handelt es sich um Bestandteile von Kalkturbiditen. Aufgrund der mikritischen Matrix läßt sich annehmen, daß der Mikrofaziestyp 14 unter geringerer Wasserenergie als der Mikrofaziestyp 12 abgelagert wurde.

Vorkommen: Beisinghäuser Kalk des höchsten Mitteldevons bis tiefsten Oberdevons.

Mikrofaziestyp 15 (Tafel 8, Fig. 1)

FOLK-Klassifikation: Biogenreicher Oosparit.

DUNHAM-Klassifikation: Grain- bis Rudstone aus Ooiden und Schalen.

Kurzbeschreibung: Ooide (ca. 35-80 % der Partikel) und Schalen (ca. 15-60 % der Partikel) sind die wichtigsten Partikel, während andere Partikel nur eine untergeordnete Rolle spielen. Zwischen den Partikeln ist sparitischer Zement.

Beschreibung: Diesem Mikrofaziestyp werden Grainstones (bis Rudstones) zugerechnet, deren dominierende Partikel Ooide (ca. 35-80 % der Partikel) und Schalen (bzw. Schalenfragmente) (ca. 15-60 % der Partikel) sind. Beide Gruppen zusammen stellen immer ca. 95 % der Partikel. Die restlichen ca. 5 % Partikel umfassen abgerollte Crinoidenreste (vermutlich Trochiten) von bis zu 6 mm Durchmesser (ziemlich selten), kleine Gastropoden von bis zu 2 mm Durchmesser (selten), Pelloide (ziemlich selten), Kotpillen (selten) und Intraklasten (selten). Die Crinoidenreste sind fast immer von mikriterfüllten Bohrgängen durchzogen. Im Dünnschliff schwankt zwischen fließend ineinander übergehenden Lagen das Verhältnis von Ooiden zu Schalen in den oben angegebenen Grenzen. Insgesamt gesehen dominieren die Ooide deutlich.

Der Durchmesser der Ooide variiert je nach Dünnschliff zwischen 0,2-0,7 mm und 0,4-1,2 mm, wobei in Lagen mit zahlreichen großen Schalen auch der durchschnittliche Ooid-Durchmesser relativ groß ist. Die Kerne der Ooide werden sehr häufig von Schalenfragmenten sowie selten von Echinodermenresten und kleinen Gastropodenschalen gebildet. Die konzentrischen Wände der Ooide können im Durchlicht hell sein und grob radialfaserig gebaut sein oder ihr Bau ist mikritisch mit manchmal erkennbarer konzentrischer Laminierung. Wenn beide Wandtypen in einem Ooid auftreten, ist die mikritische Wand immer außen und die radialfaserige innen. Das ist ein Hinweis darauf, daß diese mikritischen Ooid-Wände durch die Mikritisierung von Radialooiden mittels bohrender Algen und Pilze entstanden (vgl. dazu: FLÜGEL 1978: 123; 1982: 151). Die Ooide umfassen Normal- und Einfachooide; Einfachooide sind seltener als Normalooide.

In der Partikel-Gruppe der Schalen treten als einzige Typen *Coenothyris*-Schalen und ehemals aragonitische Muschelschalen auf. Die Schalen sind fast immer disartikuliert und ansatzweise bis ausgeprägt eingeregelt; nur sehr selten lassen sich zweiklappige *Coenothyris*-Exemplare beobachten. Die Schalen können ± vollständig aussehen und bis zu 22 mm Länge im Dünnschliff haben, oder sie können auf bis zu 0,5 mm lange Fragmente zerkleinert sein. Dazwischen gibt es alle Übergänge. Allgemein gilt, daß in ooidreicheren Lagen die Schalenfragmente kleiner sind als in schalenreicheren Lagen. Je nach Dünnschliff überwiegen die ehemals aragonitischen Muschelschalen oder die *Coenothyris*-Schalen, aber die ehemals aragonitischen Muschelschalen sind immer häufig. Nicht selten sind die *Coenothyris*-Schalen randlich etwas angebohrt, und vereinzelt läßt sich auf ihnen eine dünne Mikritrinde beobachten. Die ehemals aragonitischen Muschelschalen zeigen immer eine - meist dünne - Mikritrinde und gelegentlich Anbohrungen in Gestalt von mikriterfüllten Gängen.

Normalerweise befindet sich zwischen den Partikeln nur Zement, aber gelegentlich kann an geschützten Stellen etwas Mikrit auftreten. Es gibt fließende Übergänge zum Mikrofaziestyp 16. Es lassen sich zwei Zement-Generationen unterscheiden, die beide gut und ± überall entwickelt sind: ein radialfaseriger Rasenzement (= Zement A) und der aus blockigem Sparit bestehende Zement B. Die Karbonatfärbung nach FÜCHT-BAUER & RICHTER (1988: 241) zeigt keine Unterschiede im Eisengehalt, da sowohl Partikel und Mikrit als auch Zement und der Sparit verheilte Risse aus (± eisenfreiem) Kalzit bis Fe-I-Kalzit bestehen.

In allen Dünnschliffen findet sich eine Dolomitisierung. Sie wirkte selektiv und betraf am stärksten Ooid-Wände und mikritische Substanz - ebenso wie im Mikrofaziestyp 2 (siehe dort). Die Dolomitisierung führt nicht selten zur völligen Unkenntlichmachung einzelner Ooide. Der Dolomit umfaßt ca. 10 % der gesamten Dünnschliff-Fläche. Er besteht aus (z. T. rhomboedrischen) Kristallen von 0,1-0,6 mm Durchmesser. Die Dolomitisierung muß aus den beim Mikrofaziestyp 1 diskutierten Gründen spätdiagenetisch erfolgt sein. Stellenweise läßt sich eine beginnende Dedolomitisierung beobachten: Makroskopisch zeigen diese Berei-

che eine gelbbraune Färbung der entsprechenden Partien; mikroskopisch kann man bräunliche Säume an den Dolomit-Kristallen oder - bei fortgeschrittenen Stadien - zusätzlich auch bräunliche Flecken in den Kristallen erkennen.

Vergleiche mit beschriebenen Mikrofaziestypen: Weitgehende Ähnlichkeit besitzt der Mikrofaziestyp 15 mit dem Mikrofaziestyp 2, von dem er sich nur durch seine erheblich größere Häufigkeit von Ooiden und *Coenothyris*-Schalen unterscheidet. Auch die von SCHNEIDER (1957: 202-203, Taf. 1 Fig. 1-4) aus dem Trochitenkalk des Saarlandes beschriebenen „oolithischen Kalke“ zeigen eine große Ähnlichkeit mit dem Mikrofaziestyp 15, enthalten aber mehr Pelloide und weniger Schalenreste als der Mikrofaziestyp 15. Der Mikrofaziestyp „Oobiosparit“ umfaßt in der von SCHWENKE (1993: 31-33) gegebenen Definition auch Gesteine des Mikrofaziestyps 15. Der von THIELE (1990: 42, Abb. 19-20) aus dem Unteren Muschelkalk beschriebene Mikrofaziestyp „Oosparit-Oobiosparit“ unterscheidet sich durch die erheblich kleineren Ooide und den geringeren Schalen-Anteil. Unter den Standardmikrofaziestypen von WILSON (1975: 63-69) bietet sich zum Vergleich nur Nr. 15 an, der für den Bewegtwasser-Bereich auf Untiefen sowie an Küsten und Gezeitenbarren charakteristisch ist (vgl. FLÜGEL 1978: 336; 1982: 407).

Sedimentäres Environment und Genese: Durch die sehr weitgehend ausgewaschene mikritische Matrix, das häufige Auftreten von Ooiden und das Auftreten ± stenohaliner Organismen erweist sich der Mikrofaziestyp 15 als das Produkt eines flachmarinen turbulenten Environments im Subtidal oberhalb der Schönwetter-Wellenbasis. Auch das häufige Auftreten von Mikritrinden spricht für gut durchlichtetes Bewegtwasser (siehe FLÜGEL 1978: 130-133).

Vorkommen: Terebratelkalk [= Osnabrück-Member der Trochitenkalk-Formation im Sinne von HAGDORN, HORN & SIMON (1993: 44)] des Oberen Muschelkalks. Die Untersuchungen im Trochitenkalk bei Helpup (siehe Kap. 3.4.2.) sowie die Ausführungen von DUCHROW & GROETZNER (1984: 185-187, 192), LANGER (1989: 43, 57-58) und SCHWENKE (1993: 84-89) zeigen, daß die Mikrofaziestypen 15 und 16 infolge der großen Häufigkeit von Ooiden und *Coenothyris*-Schalen sowie der großen Seltenheit von Trochiten dem Terebratelkalk, aber nicht dem Trochitenkalk sensu stricto angehören.

Mikrofaziestyp 16

(Tafel 8, Fig. 2)

FOLK-Klassifikation: Biogenreicher Oomikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Wacke- bis Floatstone (bis Packstone) aus Ooiden und Schalen.

Kurzbeschreibung: Dieser Mikrofaziestyp unterscheidet sich vom Mikrofaziestyp 15 durch die mikritische Matrix, in der oft „Algenschläuche“ entwickelt sind.

Beschreibung: Die Partikel bauen mäßig dicht bis dicht gepackte Wacke- bis Floatstones auf; Übergänge zu Packstones oder schlecht ausgewaschenen Grainstones können auftreten. Es gibt Übergänge zu den Mikrofaziestypen 15 und 17. Art, Ausbildung und Häufigkeit der Partikel entsprechen dem Mikrofaziestyp 15. 90-95 % der Partikel sind Ooide oder Schalen. In den restlichen 5% bis maximal 10 % der Partikel spielen abgerollte Intraklasten aus Material des Mikrofaziestyps 16 von bis zu 10 mm Länge und abgerollte Trochiten von bis zu 8 mm Länge die dominierende Rolle. Die Schalen sind immer disartikuliert und zerbrochen; sie sind ansatzweise bis ausgeprägt eingeregelt. Ehemals aragonitische Muschelschalen sind häufiger als *Coenothyris*-Schalen.

Zwischen den Partikeln ist Mikrit, nur unter abschirmenden Schalen und/oder zwischen besonders dicht gepackten Partikeln kann Sparitzement sein. In Einzelfällen eingeschaltete Lagen von schlecht ausgewaschenen Grainstones bilden den Übergang zum Mikrofaziestyp 15. Die mikritische Matrix zeigt oft - aber nicht immer - die aus dem Mikrofaziestyp 3 bekannten „Algenschläuche“, die völlig der beim Mikrofaziestyp 3 gegebenen Beschreibung entsprechen (siehe auch MAY 1994d: Abb. 5). In Partien mit häufigen „Algenschläuchen“ zeigt sich stellenweise ein Aufbau des Mikrites aus Peloiden. Auch sonst läßt sich bei relativ geringer Mikritdichte (z. B.: Dünnschliff E 7) ein Aufbau aus Peloiden (oder ein Zerfall in Pelloide) von 0,06-0,6 mm Durchmesser beobachten. [Dieses Phänomen wird beim Mikrofaziestyp 1 diskutiert.]

Für die Mineralogie und die Diagenese gilt das beim Mikrofaziestyp 15 gesagte. Die Dolomitisierung geht von Ooiden aus; denn die Ooide sind bevorzugt dolomitisiert. Der Dolomit-Anteil schwankt zwischen 2% und 15 % der gesamten Dünnschliff-Fläche.

Vergleiche mit beschriebenen Mikrofaziestypen: Weitgehende Ähnlichkeit zeigt der Mikrofaziestyp 16 mit dem Mikrofaziestyp 3, von dem er sich nur durch seine erheblich größere Häufigkeit von Ooiden unterscheidet. Der von SKUPIN (1970: 77-81, Abb. 10) beschriebene „Oo-Bio-Mikrit“ unterscheidet sich nur durch seinen geringeren Schalen-Anteil vom Mikrofaziestyp 16.

Sedimentäres Environment und Genese: Die Analogie zum Mikrofaziestyp 3 (siehe Ausführungen dort) und das Auftreten von „Algenschläuchen“ sind Argumente für die Annahme, daß der Mikrofaziestyp 16 unter den gleichen Bedingungen wie der MF 15 entstand und daß der Mikrit durch die „Algenschläuche“ fixiert wurde. Da es aber Übergänge zum Mikrofaziestyp 17 gibt und einige Proben keine „Algenschläuche“ zeigen, ist es gut möglich, daß ein Teil der zugerechneten Proben in etwas tieferem Wasser entstand. Aber auf jeden Fall lag der Ablagerungsraum oberhalb der Sturm-Wellenbasis.

Vorkommen: Terebratelkalk des Oberen Muschelkalks (vgl. Mikrofaziestyp 15).

Mikrofaziestyp 17 (Tafel 8, Fig. 3-4)

FOLK-Klassifikation: Biomikrit.

DUNHAM-Klassifikation: Schalen-Floatstone.

Kurzbeschreibung: Locker bis mäßig dicht gepackte Floatstones aus *Coenothyris*-Schalen und normalerweise weniger häufigen ehemals aragonitischen Muschelschalen. Ooide sind selten oder fehlen. Bioturbation kann auftreten.

Beschreibung: Dem Mikrofaziestyp 17 werden Floatstones aus locker bis mäßig dicht gepackten Schalen zugerechnet. Die in mikritischer Matrix schwimmenden Schalen bedecken 15-40 % der Dünnschliff-Fläche. Normalerweise dominieren *Coenothyris*-Schalen, nur sehr selten (Probe E 23) überwiegen ehemals aragonitische Muschelschalen. In den meisten Dünnschliffen treten neben den dominierenden *Coenothyris*-Schalen auch ehemals aragonitische Muschelschalen auf - nur wenige Dünnschliffe zeigen überhaupt keine Muschelschalen. Die immer disartikulierten Schalen sind bis zu 0,7 mm dick und und angedeutet bis deutlich eingeregelt. Die Schalen sind normalerweise in Fragmente von 0,3-18 mm Länge zerbrochen. Mikritrinden sind selten und schwach entwickelt. Nicht selten zeigen die Schalen (insbesondere *Coenothyris*-Schalen) kleine, senkrecht zur Schale verlaufende Anbohrungen.

Die maximal 5 % der Partikel, die nicht zur Partikel-Gruppe der Schalen gehören, umfassen: kleine (= bis zu 2 mm große) Gastropoden, abgerollte Echinodermen-Fragmente, Fragmente von Wirbeltierknochen (sehr selten) und Ooide. In den meisten Dünnschliffen sind gar keine Ooide. Wenn Ooide auftreten, stellen sie maximal 5 % der Partikel und sind $\pm$ vollständig dolomitisiert. Es gibt Übergänge zum Mikrofaziestyp 16.

Der Mikrit der Matrix ist normalerweise homogen, zeigt aber manchmal einen Aufbau aus feinen Peloiden. „Algenschläuche“ finden sich nur in einem kleinen Teil der Dünnschliffe und wenn, dann treten sie ziemlich selten auf. Die Karbonatfärbung nach FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 241) erweist keine Unterschiede im Eisengehalt, da Partikel, Mikrit und Sparit aus ($\pm$ eisenfreiem) Kalzit bis Fe-I-Kalzit bestehen.

Die - ebenso wie bei den Mikrofaziestypen 15 und 16 spätdiagenetisch erfolgte - Dolomitisierung geht häufig von Muschelschalen oder der Grenzfläche zwischen einer *Coenothyris*-Schale und der mikritischen Matrix aus. Der Dolomit-Anteil schwankt zwischen 2 % und 15 % der gesamten Dünnschliff-Fläche. Er besteht aus (z. T. rhomboedrischen) Kristallen von 0,02-0,6 mm Durchmesser. Kleine Kristalle finden sich überwiegend fein verteilt bis diffus angereichert in der Mikrit-Matrix, während auf Schalengrenzen gewachsene oder Partikel verdrängende Dolomit-Kristalle meist relativ groß sind. Häufig lassen sich Spuren einer beginnenden Dedolomitisierung beobachten.

Die Dünnschliffe E 5, E 16 und E 27 zeigen ausgeprägte Bioturbation: Die Schalen liegen wirt durcheinander, stellenweise sogar bevorzugt senkrecht zur Schichtung. Die durch die Bioturbation erzeugten Sedimentstrukturen werden durch Stylolithen überprägt. Mit den stylolithenreichen Partien ist die Dolomitisierung verknüpft. Stylolithen, die sich in kurzaushaltenden $\pm$ schichtparallelen Lagen zu bis zu 7 mm dicken Zonen mit intensiver Dolomitisierung der Matrix und Anreicherung von Schalenresten sammeln, und dünne Stylolithen, die zwischen diesen Lagen netzartige Strukturen bilden, führen zu einem ausgeprägt lagig-knolligen Gefüge im Dünnschliff.

Vergleiche mit in der Literatur beschriebenen Mikrofaziestypen: Nur ein Teil der von SCHNEIDER (1957: 206-207, Taf. 4-5) aus dem Trochitenkalk des Saarlandes beschriebenen „Bruchschill-Kalke“ stimmt mit dem Mikrofaziestyp 17 überein, da er Kalke mit mikritischer Matrix (SCHNEIDER 1957: Taf. 4 Fig. 2, Taf. 5 Fig. 1) mit Kalken vereinigt, die stattdessen Sparitzement enthalten. Zum Vergleich mit dem Mikrofaziestyp 17 bieten sich die von LUKAS (1991: 133-134, Taf. 2 Fig. 6-7) aus dem Unteren Muschelkalk beschriebenen „Brachiopoden Packstones-Floatstones“ an, die er einem ruhigen Ablagerungsraum mit guter Zirkulation zwischen Schönwetter- und Sturm-Wellenbasis zuordnet. Die Schille des Mikrofaziestyps 17 sind Sturmschille im Sinne der Gliederung von STRAUCH (1990), obwohl sie im Gegensatz zu den von STRAUCH (1990: 425-426) angeführten känozoischen Sturmschillen artenarm sind.

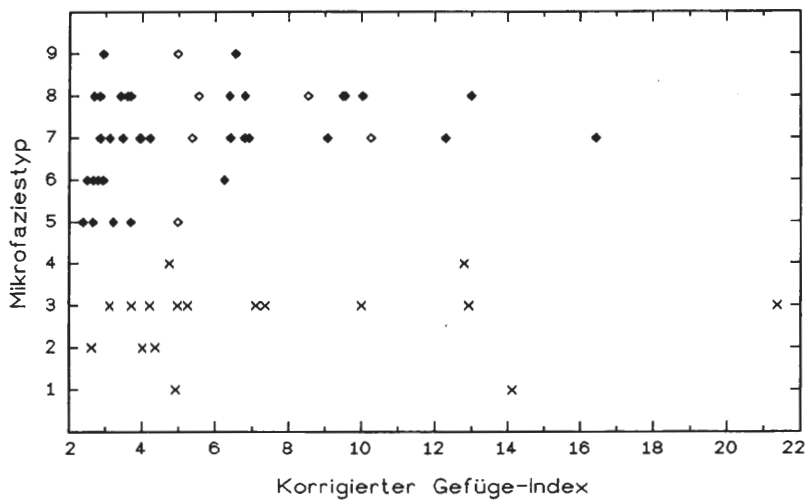


Abb. 10: Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Mikrofaziestyp. Probenkollektive S (x) und K (◇). ◇ kennzeichnen Proben des Probenkollektivs K mit einem Dimensions-Index kleiner als 0,15.

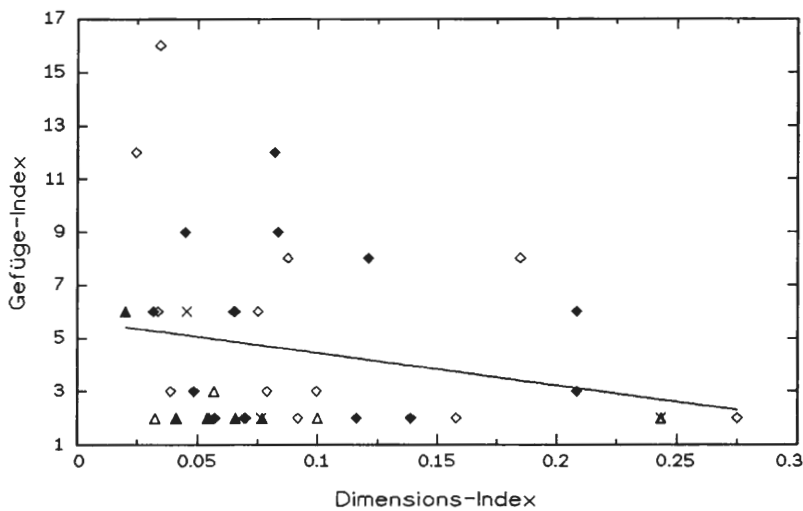


Abb. 11: Diagramm der Korrelation zwischen dem Dimensions-Index und dem Gefüge-Index. Probenkollektiv K. Symbole der Mikrofaziestypen: 5 = △, 6 = ▲, 7 = ◇, 8 = ◆, 9 = x.

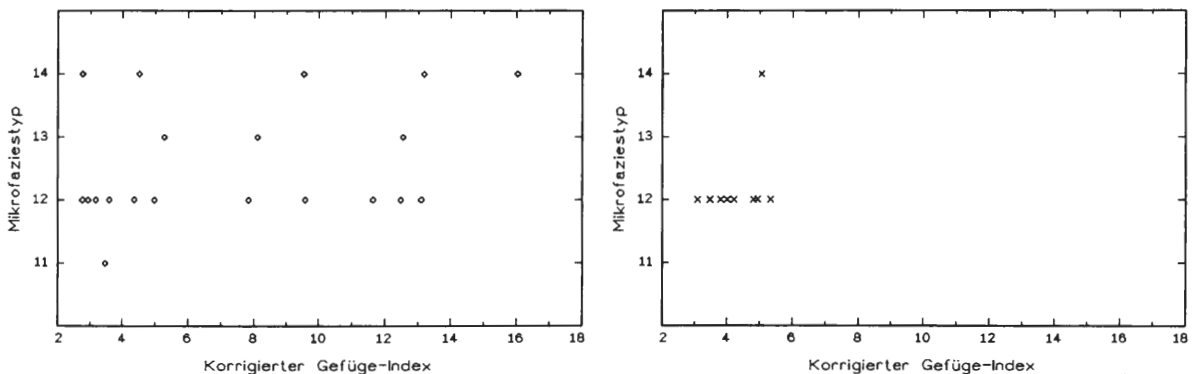


Abb. 12: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Mikrofaziestyp. Probenkollektiv P. Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1), rechts nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

Durch ihre erheblich größere Artendiversität unterscheiden sich auch die von TÖRÖK (1993: 136, Abb. 11-14) aus den *Coenothyris*-Schichten des ungarischen Muschelkalks beschriebenen Sturmschille.

Sedimentäres Environment und Genese: Die Gemeinschaft aus zerbrochenen *Coenothyris*-Schalen und mikritischer Matrix dokumentiert eine Sedimentation in einem $\pm$ normal marinen Ablagerungsraum zwischen Schönwetter- und Sturm-Wellenbasis. Damit stimmt überein, daß der Hauptlebensraum von *Coenothyris* im tieferen, ruhigeren Bereich der Schwellen-Flanken lag (DUCHROW & GROETZNER 1984: 195). Die Schill-Zusammenschwemmung erfolgte durch die erhöhte Wasserbewegung bei starken Stürmen.

Vorkommen: Terebratelkalk des Oberen Muschelkalks. *Coenothyris*-Schille - wie der Mikrofaziestyp 17 - sind für bestimmte Abschnitte des Terebratelkalks charakteristisch (siehe z. B.: DUCHROW & GROETZNER 1984: 185-186; LANGER 1989: 43, 57; NOLTE 1982: 48; SCHWENKE 1993: 84-90).

4.2.2. Verwitterungsbeständigkeit der Mikrofaziestypen

Die Abbildungen 10 und 12 zeigen die Zusammenhänge zwischen dem korrigierten Gefüge-Index (als Maß für die Verwitterungsbeständigkeit) und dem Mikrofaziestyp. Beim Probenkollektiv S läßt sich keine sehr ausgeprägte Abhängigkeit erkennen. Das liegt zu einem Teil daran, daß das Probenkollektiv so wenig Proben umfaßt, zu einem anderen Teil aber auch daran, daß sich die Mikrofaziestypen 1-4 nicht sehr unterscheiden und durch fließende Übergänge miteinander verbunden sind. Auffällig ist trotzdem die große Verwitterungsbeständigkeit des Mikrofaziestyps 2. Zu einem Teil läßt sie sich mit seinen Porositätseigenschaften erklären (siehe Kap. 4.3.), zu einem anderen Teil dürfte der verhältnismäßig große Anteil an sparitischem Zement zur größeren Verwitterungsresistenz beigetragen haben. DUTTLINGER & KNÖFEL (1989: 102) stellten bei der Untersuchung von Schäden an einem Brunnen aus Oberem Muschelkalk fest, daß ein Kalkstein mit „marmorähnlichem“, körnig-verzahntem Gefüge aus millimetergroßen „Sammelkristallisationscalciten“ erheblich verwitterungsbeständiger als ein Kalkstein mit großem Feinanteil war. PAN (1988: 305-306) machte die Erfahrung, daß sparitische Kalksteine weniger stark durch Regenwasser korrodiert werden als Mikrite. DOE (1989: 1) beobachtete, daß grobkörniger Marmor verwitterungsbeständiger als feinkörniger Marmor ist. KETTELHACK (1992: 89) erklärte bei einem Vergleich von zwei oberkretazischen Kalksandsteinen (Altenberger Stein und Baumberger Sandstein) die größere Verwitterungsbeständigkeit des Altenberger Steins unter anderem mit folgendem: „Die Grundmasse des Altenberger Steins besteht überwiegend aus grobkristallinen Kalzitkristallen, die Grundmasse des Baumberger Sandsteins dagegen ist feinkristallin...“ Alle vier Untersuchungen unterstützen die gegebene Erklärung für die Verwitterungsbeständigkeit des Mikrofaziestyps 2.

Klarer sind die Verhältnisse im Probenkollektiv K: Die Mikrofaziestypen 5 und 6 sind erheblich verwitterungsbeständiger als die Mikrofaziestypen 7 und 8. Das zeigt sich z. B. sehr deutlich, wenn man die verschiedenen Mikrofaziestypen in das Korrelationsdiagramm Dimensions-Index gegen Gefüge-Index einträgt (siehe Abb. 11). Meines Erachtens liegt ein wichtiger Grund für diesen Unterschied im unterschiedlichen Gefüge. Die Mikrofaziestypen 5 und 6 entstanden als Tempestite durch einzelne Sedimentationsereignisse (Sturmfluten) und zeigen ein ungeschichtetes, $\pm$ homogenes Gefüge, das der Verwitterung wenig „Angriffsfläche“ bietet. Obwohl die Mikrofaziestypen 5 und 6 nie einen ganzen Mauerstein erfüllen, da ihre Lagen zu geringmächtig sind, können sie seinen inneren Zusammenhalt und seine Verwitterungsbeständigkeit erheblich verbessern. Demgegenüber sind die Mikrofaziestypen 7 und 8 Ergebnisse langsamerer, kontinuierlicher Sedimentation und zeigen eine ausgeprägte Schichtung, die mit ihren Diskontinuitäten und Trennflächen Ansatzstellen für Verwitterungsprozesse liefert. Diese Ansicht wird durch die Feststellung von HARVEY et al. (1974: 17; 1978), daß feingeschichtete Karbonate weniger beständig (im Kristallisationstest) als ungeschichtete sind, gestützt. Weiterhin beobachteten ROSSI-MANARESI et al. (1992: 570), daß ein laminierter Kalkstein stärker als ein ungeschichteter Kalkstein durch Risse geschädigt war.

Der hier ausgeführte Erklärungsansatz darf nicht als erschöpfende Arbeitshypothese gelten; denn zum einen muß jede monokausale Erklärung natürlich bei so komplexen Prozessen zu kurz greifen und zum anderen zeigen die folgenden Untersuchungen, daß bestimmte Gesteinsparameter (insbesondere Porositäts-Parameter und Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand), die nicht notwendigerweise von im Dünnschliff erkennbaren Gefügemerkmalen abhängig sind, die Verwitterungsbeständigkeit sehr stark beeinflussen. Aber schon bei der Verwitterungsbeständigkeit der Mikrofaziestypen erscheinen Probleme: Unklar ist z. B., ob die recht große Verwitterungsbeständigkeit des Mikrofaziestyps 9 nur durch die geringe Probenmenge vorgetäuscht wird - es liegen nur 3 Mauersteine vor -, oder ob sie der Realität entspricht. Auch der Mikrofaziestyp 10 wirft Fragen auf, denn sein Verhalten im Probenkollektiv H (siehe Kap. 3.2.2) und seine - in bezug auf seine Häufigkeit in der Schichtenfolge - zu geringe Verwendung als Baumaterial doku-

mentieren eine geringe Verwitterungsbeständigkeit; seine Verwitterungsbeständigkeit läßt sich jedoch nicht in eine Relation zu den anderen Mikrofaziestypen setzen, da er im statistisch auswertbaren Probenkollektiv K fehlt. Aufgrund dieser Beobachtungen läßt sich allerdings vermuten, daß er noch weniger verwitterungsbeständig als die Mikrofaziestypen 7 und 8 ist. Die weiteren, auch an Proben des Mikrofaziestyps 10 durchgeführten Untersuchungen bestätigen die angenommene geringe Verwitterungsbeständigkeit des Mikrofaziestyps 10 (siehe Kap. 4.3. und 5.1.2.).

Unbefriedigend ist die Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und dem korrigierten Gefüge-Index im Probenkollektiv P aufgrund der sehr großen Streuung (siehe Abb. 12). Daß Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen den verschiedenen Mikrofaziestypen des Probenkollektivs P so wenig auffällig sind, dürfte darauf beruhen, daß sich die Mikrofaziestypen selbst nur wenig voneinander unterscheiden. Da nur ein einziger Mauerstein mit dem Mikrofaziestyp 11 vorliegt, läßt sich der bei ihm gemessene niedrige korrigierte Gefüge-Index nicht verallgemeinern. Auf den ersten Blick unterscheiden sich die Mikrofaziestypen 12-14 nicht sonderlich in ihrer Verwitterungsbeständigkeit. Bei genauer Betrachtung der beiden Generationen zeigt sich jedoch, daß der Mikrofaziestyp 14 tendenziell einen größeren korrigierten Gefüge-Index als der Mikrofaziestyp 12 hat. Da sich der Mikrofaziestyp 14 vom Mikrofaziestyp 12 nur durch das Auftreten einer mikritischen Matrix unterscheidet, sind die Parallelen zum Probenkollektiv S (siehe oben) offensichtlich: In beiden Fällen sind Kalksteine mit einem sparitischen Zement etwas verwitterungsbeständiger als vergleichbare Kalksteine mit einer mikritischen Matrix.

Neben dem Mikrofaziestyp wurde an jedem Dünnschliff des Probenkollektivs P auch die Korngröße der Partikel festgestellt (ausgedrückt im Median der Korngröße), um sehen zu können, ob bei arenitischen Kalen die Korngröße die Verwitterungsbeständigkeit beeinflußt. Es ließ sich aber kein Zusammenhang erkennen.

Im Probenkollektiv E läßt sich überhaupt keine Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und dem korrigierten Gefüge-Index erkennen. Das ist bemerkenswert, da aufgrund der Erfahrungen mit den Probenkollektiven S und P die mikrofazialen Merkmale der im Probenkollektiv E unterschiedenen Mikrofaziestypen 15-17 erwarten lassen, daß der Mikrofaziestyp 15 (= Oosparit) verwitterungsbeständiger als der Mikrofaziestyp 17 (= Biomikrit) ist. Diese Erwartung bestätigt sich nicht. Allerdings ist damit die Arbeitshypothese „Kalksteine mit einem sparitischen Zement sind verwitterungsbeständiger als vergleichbare Kalksteine mit einer mikritischen Matrix“ noch nicht widerlegt, wie die Messungen mit der Auftriebsmethode (Kap. 4.3.) zeigen; denn im Mikrofaziestyp 15 sind die Porositätsparameter ungünstiger für die Verwitterungsbeständigkeit als im Mikrofaziestyp 17. Im Probenkollektiv E wirken also mikrofaziale Gefüge-Eigenschaften und Porositätsparameter in bezug auf die Verwitterungsbeständigkeit antagonistisch zusammen (siehe auch Kap. 5.1.2.). Alle drei unterschiedenen Mikrofaziestypen haben eine vergleichbare Verwitterungsbeständigkeit, da beim Mikrofaziestyp 15 der verwitterungsbeständige Sparitzement mit ungünstigen Porositätsparametern gekoppelt ist, während beim Mikrofaziestyp 17 die ungünstige Wirkung der mikritischen Matrix durch die günstigeren Porositätsparameter „ausgeglichen“ wird. Der Mikrofaziestyp 16 steht in sämtlichen Merkmalen zwischen den beiden anderen Mikrofaziestypen.

4.2.3. Entwicklung von sparitverheilten Rissen und Stylolithen

Eine interessante Frage ist, inwieweit im Gestein vorhandene sparitverheilte Risse und/oder Stylolithen als Schwächezonen seine Verwitterungsbeständigkeit negativ beeinflussen. Das Ergebnis der Erhebungen läßt sich den Abb. 13-16 entnehmen. Es ist nicht sonderlich aussagekräftig, denn nur im Probenkollektiv K kann man eine schwache Korrelation zwischen dem Grad der Entwicklung von sparitverheilten Rissen - bzw. Stylolithen - und dem korrigierten Gefüge-Index ansatzweise erkennen. Ähnliche Beobachtungen machte SCHAFFER (1932: 12): In einigen Kalksteinen haben sparitverheilte Risse keine schädliche Wirkung, aber in einem anderen Fall (dem „Anston stone“ aus England) entwickelten sich nach wenigen Monaten Exposition in London zahlreiche kleine offene Risse, die durch die sparitverheilten Risse liefen.

Eine tabellarische Auflistung gibt einen wichtigen Hinweis: Alle Mauersteine der Probenkollektive K und S, die weder sparitverheilte Risse noch Stylolithen im Dünnschliff zeigen, haben einen Gefüge-Index von 2, zeigen also keinerlei Schädigung. Treten im Dünnschliff sparitverheilte Risse und/oder Stylolithen auf, kann der Gefüge-Index erheblich größere Werte als 2 annehmen, muß es aber nicht. Daraus läßt sich schließen, daß zur Entstehung der durch den Gefüge-Index beschriebenen Schäden ein Mindestmaß an primären Schwachstellen im Mauerstein (in der Form von Stylolithen und/oder sparitverheilten Rissen) notwendig ist. Über dieses Mindestmaß hinaus aber spielt die Häufigkeit von Stylolithen und/oder sparitverheilten Rissen nur noch eine untergeordnete Rolle für den Steinzerfall. Beim Probenkollektiv P läßt sich dieser Zusammenhang nicht beobachten - auch Mauersteine, die im Dünnschliff keine sparitverheilten Risse und keine Stylo-

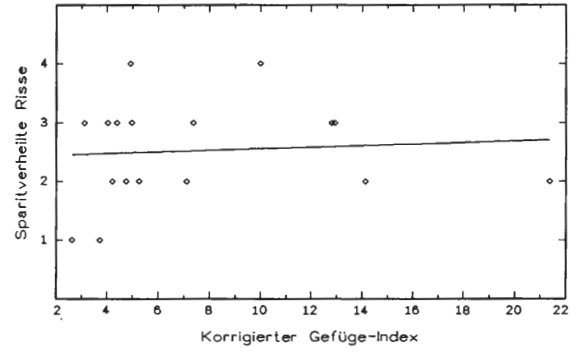
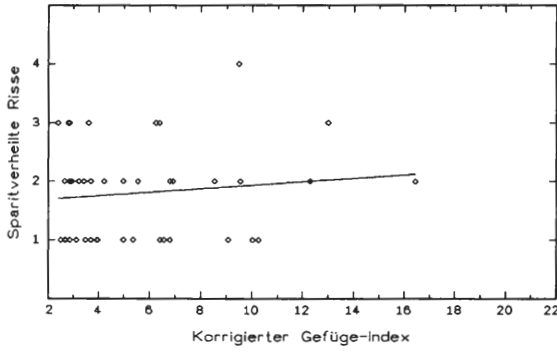


Abb. 13: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Grad der Entwicklung von sparitverheilten Rissen. Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S.

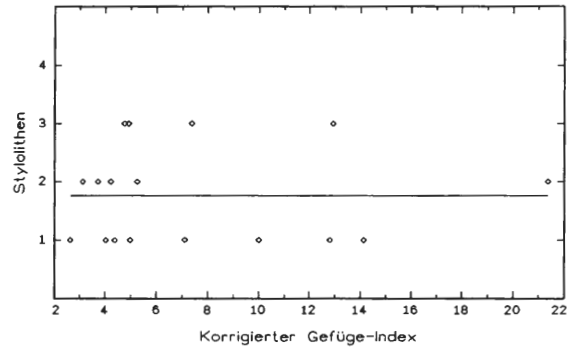
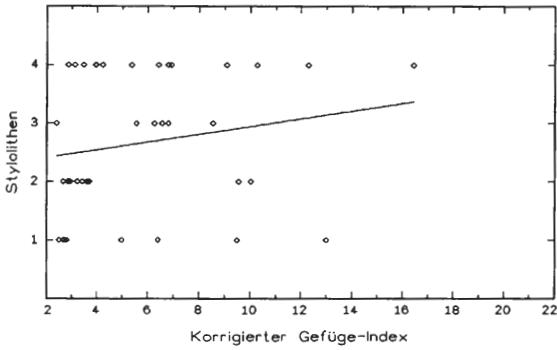


Abb. 14: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen. Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S.

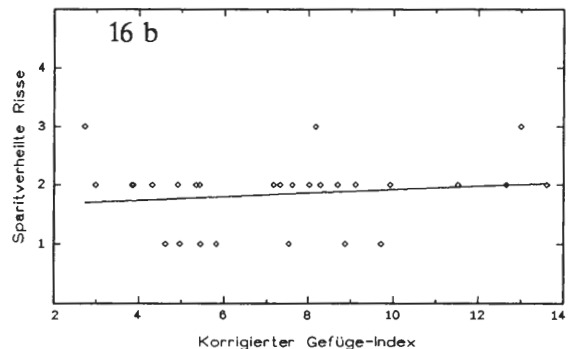
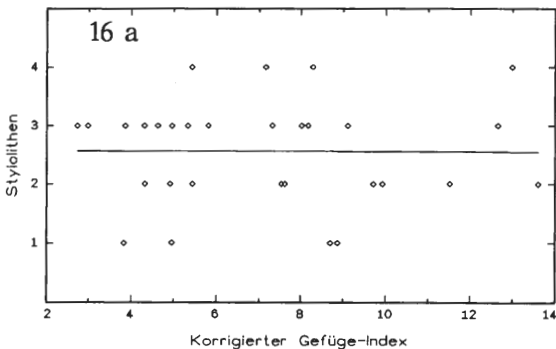
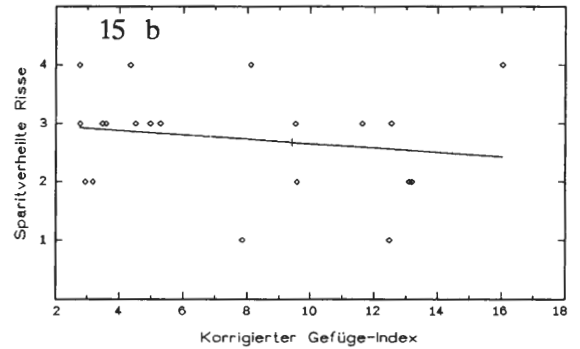
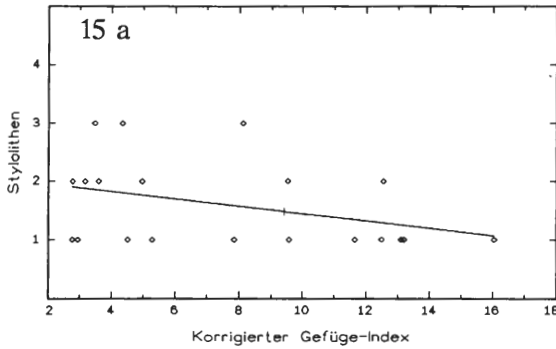


Abb. 15-16: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und a) dem Grad der Entwicklung von Stylolithen sowie b) dem Grad der Entwicklung von sparitverheilten Rissen.

Abb. 15: Probenkollektiv P, ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1). Abb. 16: Probenkollektiv E.

lithen zeigen, können einen hohen Gefüge-Index haben -, da die Mauersteine oft große, weitständige sparit-verheilte Risse besitzen, die zwar den Gesteinszusammenhalt schwächen, aber in einem Dünnschliff aus einem anderen Teil desselben Mauersteins keine Spuren hinterlassen.

Erstaunlich ist nicht, daß die Stylolithen im untersuchten Material eine Rolle beim Steinzerfall spielen, sondern daß diese Rolle anscheinend ziemlich klein ist. Immerhin verbessern sie die Wasserwegsamkeit im Stein etwas (siehe folgendes Kapitel), die Tonminerale in ihnen schwellen bei Wasserzufuhr stärker an als das umgebende Karbonatgestein (siehe z. B.: BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES 1988a: 83; ROSSI-MANARESI et al. 1992: 569) und in alpenländischen Kalksteinen des Jura (z. B. „Adneter Marmor“) fördert ihr Auftreten sehr den Steinzerfall. Bei diesen, durch ungleichmäßige Anordnung der Stylolithen oft $\pm$ knolligen Kalksteinen geht die zu einem Steinzerfall führende Verwitterung von den Stylolithen aus, in denen durch die Drucklösung tonige Substanz angereichert ist (siehe: KIESLINGER 1932: 253-256; KIESLINGER 1949: 360; DE QUERVAIN 1945: 44, 47; AMOROSO & FASSINA 1983: 230-231; GRIMM 1984a: 25, 1984b:

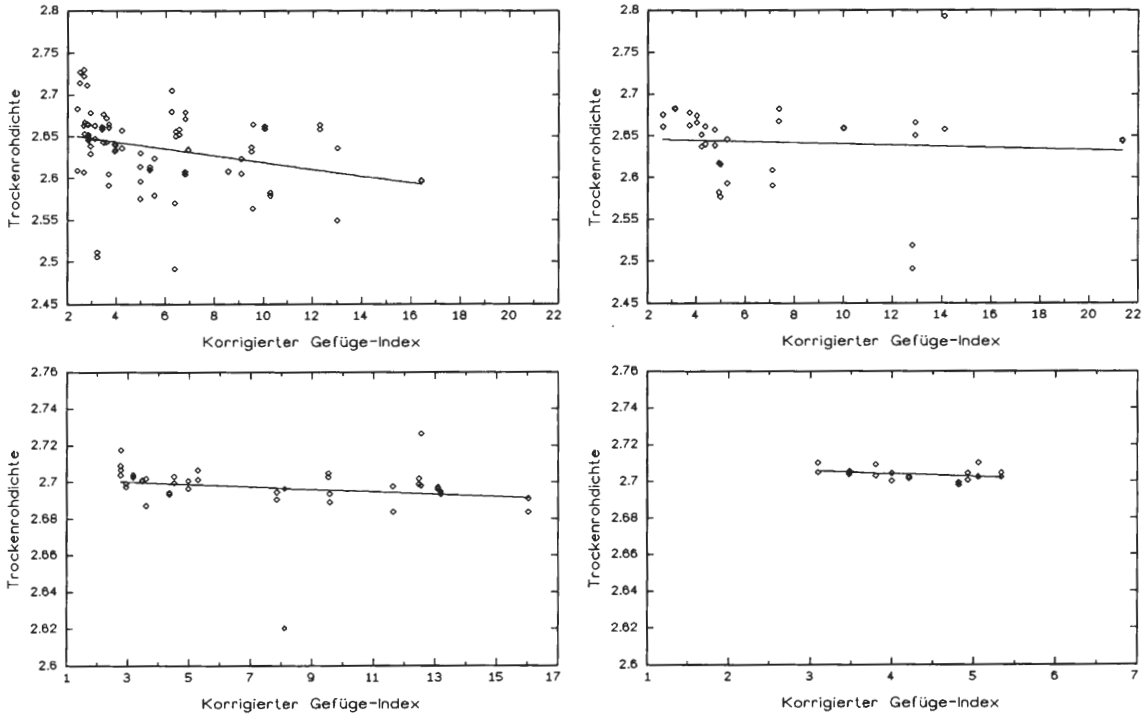


Abb. 17: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und der Trockenrohdichte (in g/cm^3). Obere Reihe: Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S. Untere Reihe: Probenkollektiv P. Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1), rechts nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

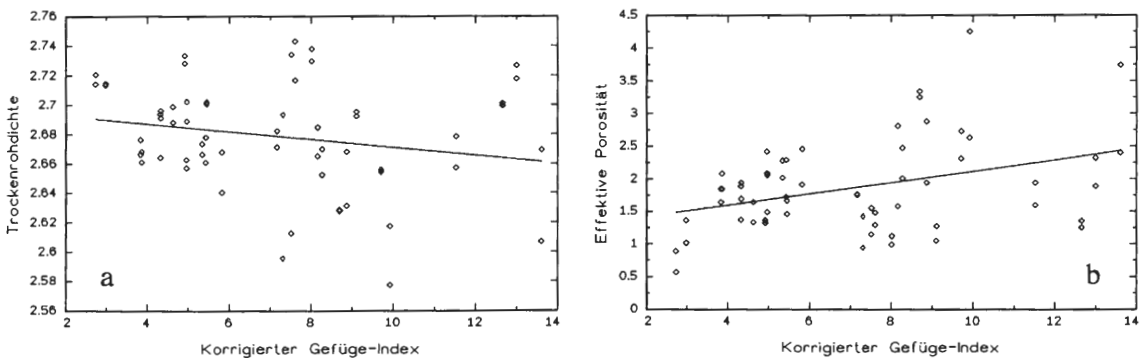


Abb. 18: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und a) der Trockenrohdichte (in g/cm^3), bzw. b) der effektiven Porosität (in Vol.-%). Probenkollektiv E.

544-545; SNETHLAGE 1984: 27-29; PASCHINGER 1985: 163). Vergleichbares berichten BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988a, b) von einem griechischen Mikrit der Oberkreide und NIJS (1985: 15; 1991: 64) sowie SIMPER (1991: 154) vom unterkarbonischen Kalkstein „Petit Granit“ bzw. „Belgisch-Granit“.

4.3. Ergebnisse der Messungen mit der Auftriebsmethode

Unter den mit der Auftriebsmethode meßbaren Gesteinsparametern besitzt die Trockenrohdichte, die in der Literatur sehr häufig bestimmt und angegeben wird, offensichtlich die geringste Bedeutung für die Verwitterungsbeständigkeit. Sie zeigt zwar eine schwache negative Korrelation mit dem korrigierten Gefüge-Index (siehe Abb. 17, 18a), aber zum einen ist die Streuung der Meßwerte recht groß, und zum anderen läßt sich diese negative Korrelation zwanglos aus der positiven Korrelation zwischen effektiver Porosität und korrigiertem Gefüge-Index ableiten.

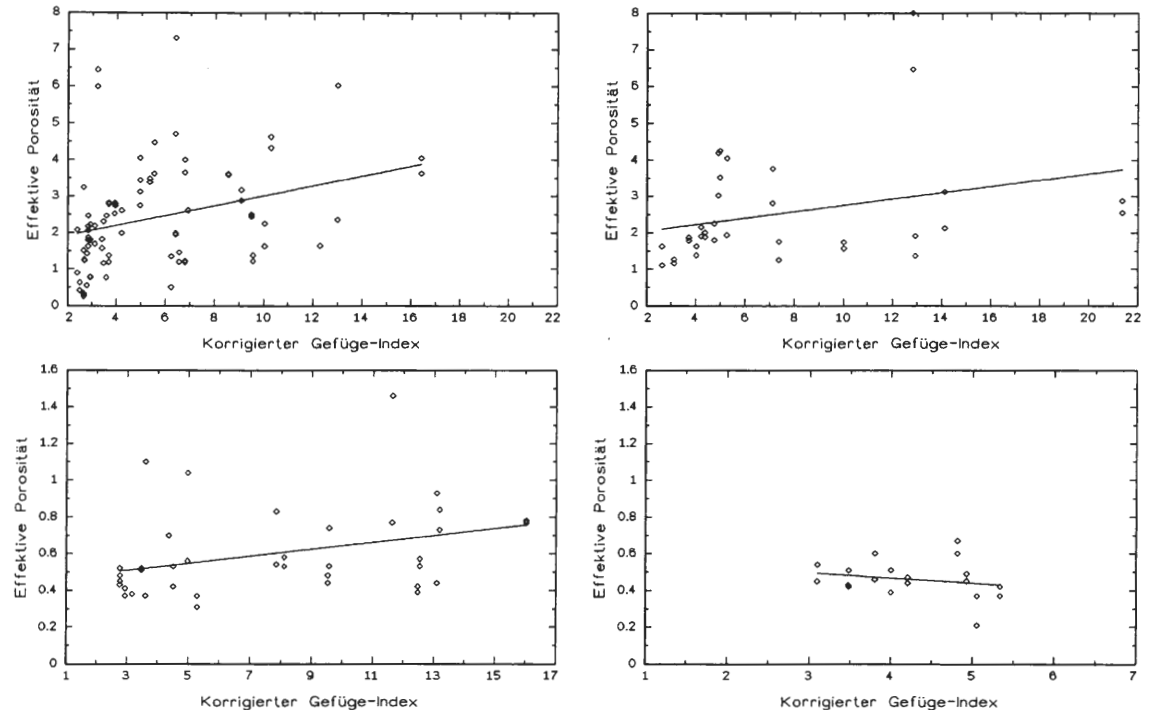


Abb. 19: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und der effektiven Porosität (in Vol.-%). Obere Reihe: Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S. Untere Reihe: Probenkollektiv P. Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1), rechts nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

Die effektive Porosität zeigt eine deutliche positive Korrelation mit dem korrigierten Gefüge-Index, d. h. je größer die effektive Porosität eines dieser Kalksteine ist, desto weniger verwitterungsbeständig ist er. Die Streuung der Meßwerte ist aber ziemlich groß (siehe Abb. 19, 18b). Das läßt sich zwar zum Teil durch methodische Probleme erklären, denn bei einer geringen Porosität ist die Messung von Wasseraufnahme und Porosität mit einer großen Ungenauigkeit behaftet; es weist darüber hinaus auch darauf hin, daß die Größe der effektiven Porosität nur von nachgeordneter Bedeutung für das Verwitterungsgeschehen ist. So vertritt z. B. schon SCHAFFER (1932: 34) die Ansicht, daß die effektive Porosität keine direkte Beziehung zur Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen hat. Vergleichbare Beobachtungen machte TABASSO (1978: 6-7). Zwar können GUERRERO et al. (1988) beobachten, daß von den 5 untersuchten Kalkstein-Typen der mit der geringsten effektiven Porosität die größte Verwitterungsbeständigkeit zeigt, aber zum einen differiert die Größe der effektiven Porosität sehr zwischen dem Kalkstein-Typ mit der geringsten Porosität (4-10 %) und dem mit der größten Porosität (33-34 %), und zum anderen unterscheiden sich diese Kalksteine auch noch in anderen Gesteinsparametern deutlich (z. B. dem Quarz-Gehalt), so daß auch hier die Bedeutung der effektiven Porosität für die Verwitterungsbeständigkeit begrenzt ist.

Die freiwillige Wasseraufnahme nach 24 Stunden Wasserlagerung zeigt eine erheblich bessere Korrelation (mit erheblich geringerer Streubreite) mit dem korrigierten Gefüge-Index als die effektive Porosität, wie man beim Vergleich von Abb. 20 mit Abb. 19 sehen kann. Je mehr Wasser das Gestein aufnimmt, desto weniger verwitterungsbeständig ist es. Die allgemeine Gültigkeit dieser Beobachtung bestätigt eine Durchsicht der Literatur: HARVEY et al. (1974; 1978) und HUDEC (1978b) stellten unabhängig voneinander bei Karbonatgesteinen fest, daß mit zunehmender freiwilliger Wasseraufnahme die Beständigkeit im Kristallisationstest (bzw. im Frost-Tau-Wechsel-Versuch) abnahm. Während

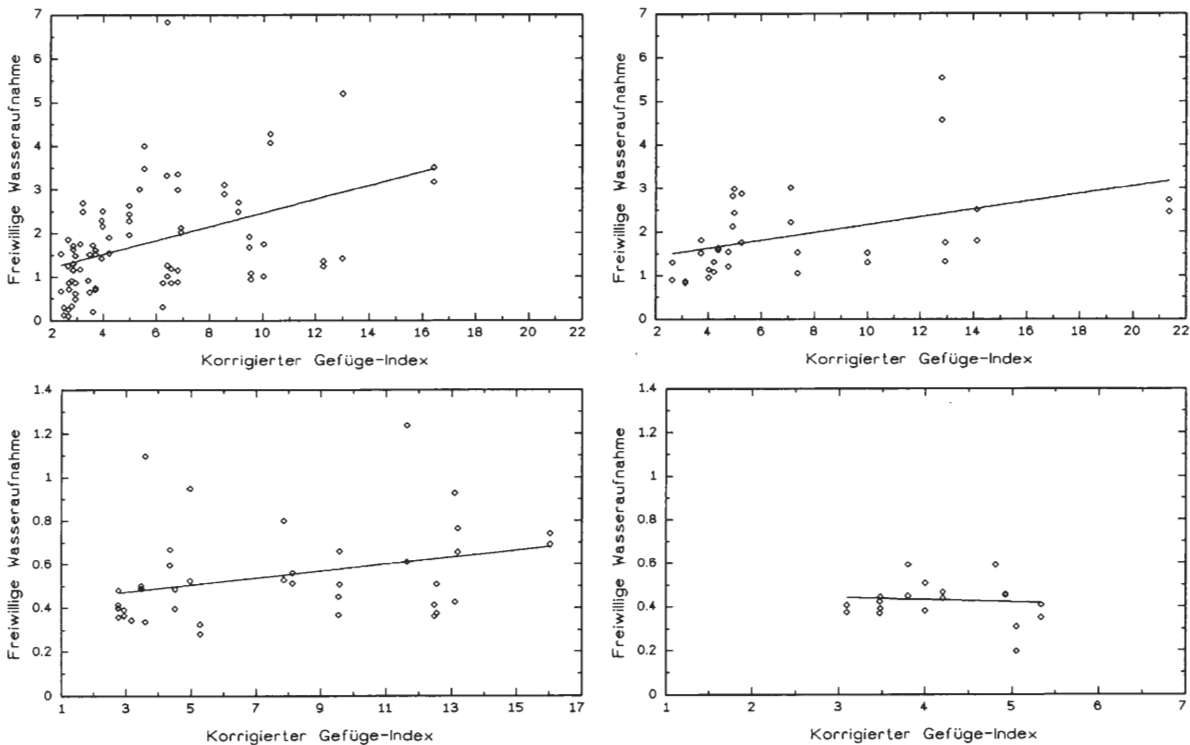


Abb. 20: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und der freiwilligen Wasseraufnahme nach 24 Stunden Lagerung (in Vol.-%).
 Obere Reihe: Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S.
 Untere Reihe: Probenkollektiv P. Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1), rechts nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

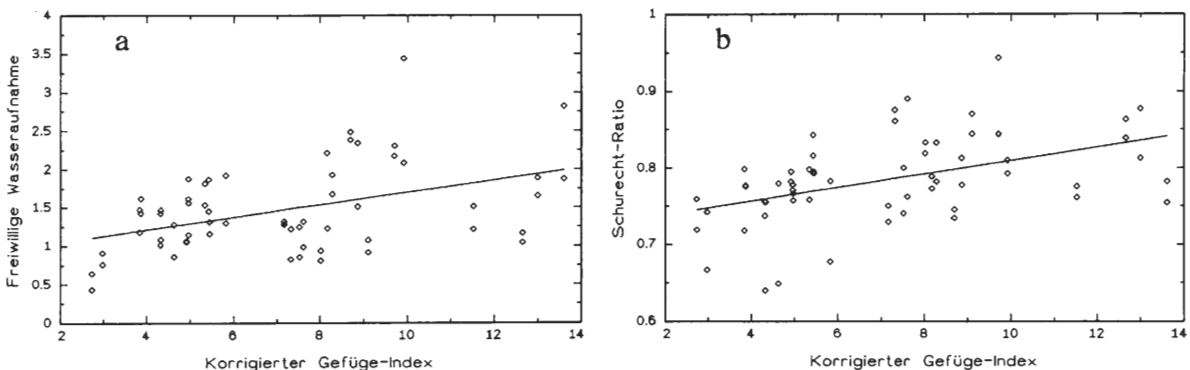


Abb. 21: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und a) der freiwilligen Wasseraufnahme nach 24 Stunden Lagerung (in Vol.-%), bzw. b) der Schurecht-Ratio. Probenkollektiv E.

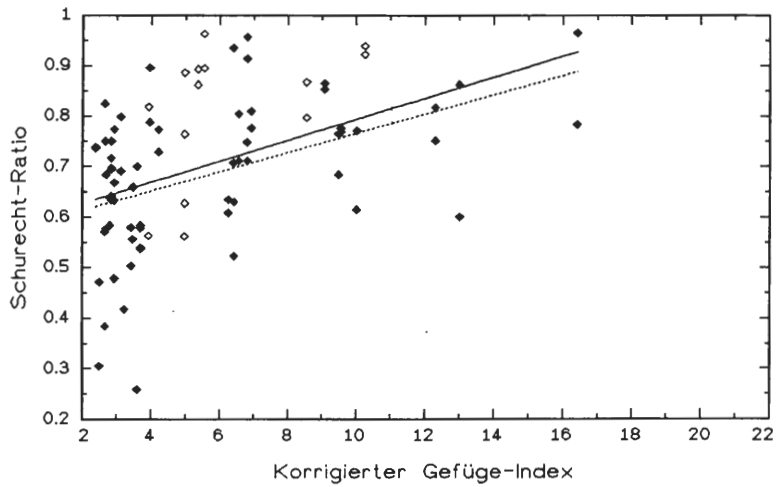


Abb. 22: Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und der Schurecht-Ratio. Gesamtes Probenkollektiv K = ◇ und —; Proben des Probenkollektivs K mit einem Dimensions-Index kleiner als 0,15 = ◆ und - - - -.

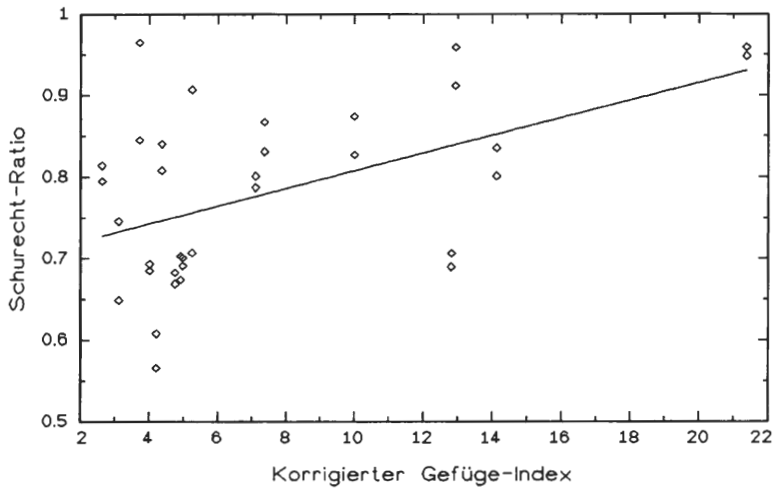


Abb. 23: Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und der Schurecht-Ratio. Probenkollektiv S.

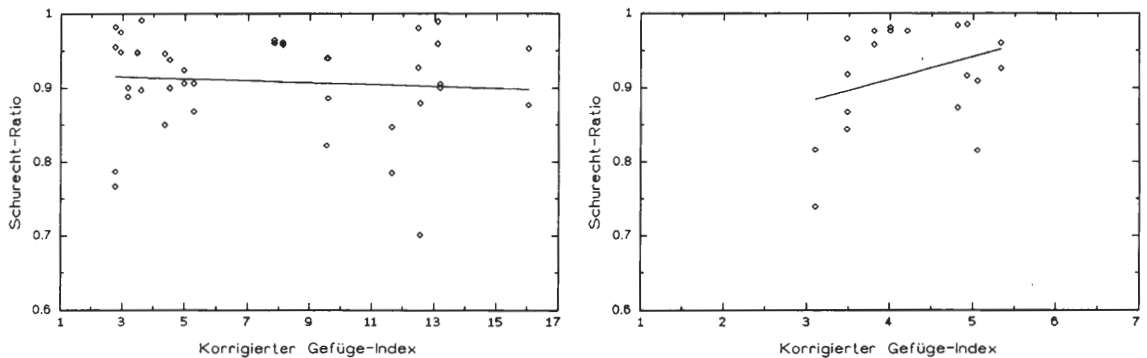


Abb. 24: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und der Schurecht-Ratio. Probenkollektiv P. Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1), rechts nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

allerdings HARVEY et al. (1974: 9, 12-13; 1978) in ihrem Material eine starke Korrelation erkennen konnten, war die Korrelation im Material von HUDEC (1978b) unbefriedigend gering. Eine vergleichbare Beobachtung machten ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977) bei gebrannten Ziegeln(!). Sie konnten die freiwillige Wasseraufnahme sogar als Maßstab für die Beständigkeit der Ziegel verwenden.

Ebenfalls gut korreliert die Schurecht-Ratio mit dem korrigierten Gefüge-Index, wobei - wie immer - das in Abb. 22 dargestellte Probenkollektiv K eine bessere Korrelation zeigt als die Probenkollektive S und E (siehe Abb. 23, 21). Daß die Korrelation im Probenkollektiv P noch schlechter ist (siehe Abb. 24), beruht darauf, daß bei einer derart geringen Porosität die Messung von Wasseraufnahme und Porosität mit einer großen Ungenauigkeit behaftet ist.

NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 15) weisen darauf hin, daß die Genauigkeit, mit der sich die Wasseraufnahme messen läßt, bei einer niedrigen effektiven Porosität (< 1%) erwartungsgemäß gering ist. Schon bei einer Flüssigkeitsaufnahme < 4% kommt es zu einer Streuung der Meßwerte (NIESEL & SCHIMMELWITZ 1982: 15). Nach DIN 52106 (11/1972: 6) sind bei einer gewichtsbezogenen Wasseraufnahme von < 1 Gew.-% die Meßwerte problematisch. Da im Probenkollektiv P die effektive Porosität meist unter 1 % liegt, sind die in den Korrelationsdiagrammen des Probenkollektivs P beobachtbare sehr große Streuung der Meßpunkte und ein gelegentlich von den vergleichbaren Korrelationsdiagrammen abweichender Verlauf der Regressionsgeraden darauf zurückzuführen und dürfen deshalb nicht überbewertet werden.

Da aufgrund dieser methodischen Probleme die Streuung der Meßwerte in einem großen Teil des Materials unbefriedigend groß ist, bietet es sich an, die beiden besten Kriterien in einem Porositäts-Index zu kombinieren:

Porositäts-Index = Schurecht-Ratio x freiwillige Wasseraufnahme

Beim Probenkollektiv K zeigt der Porositäts-Index im Vergleich zur freiwilligen Wasseraufnahme keine auffällige Verbesserung der Korrelation mit dem korrigierten Gefüge-Index - deshalb wird in dieser Arbeit auf eine graphische Darstellung verzichtet. Dafür zeigt sich aber eine deutliche Besserung der Korrelation beim Probenkollektiv S (siehe Abb. 25), das sonst immer nur sehr unbefriedigend korreliert. Auch in den Probenkollektiven P und E bessert sich die Korrelation etwas (siehe Abb. 25).

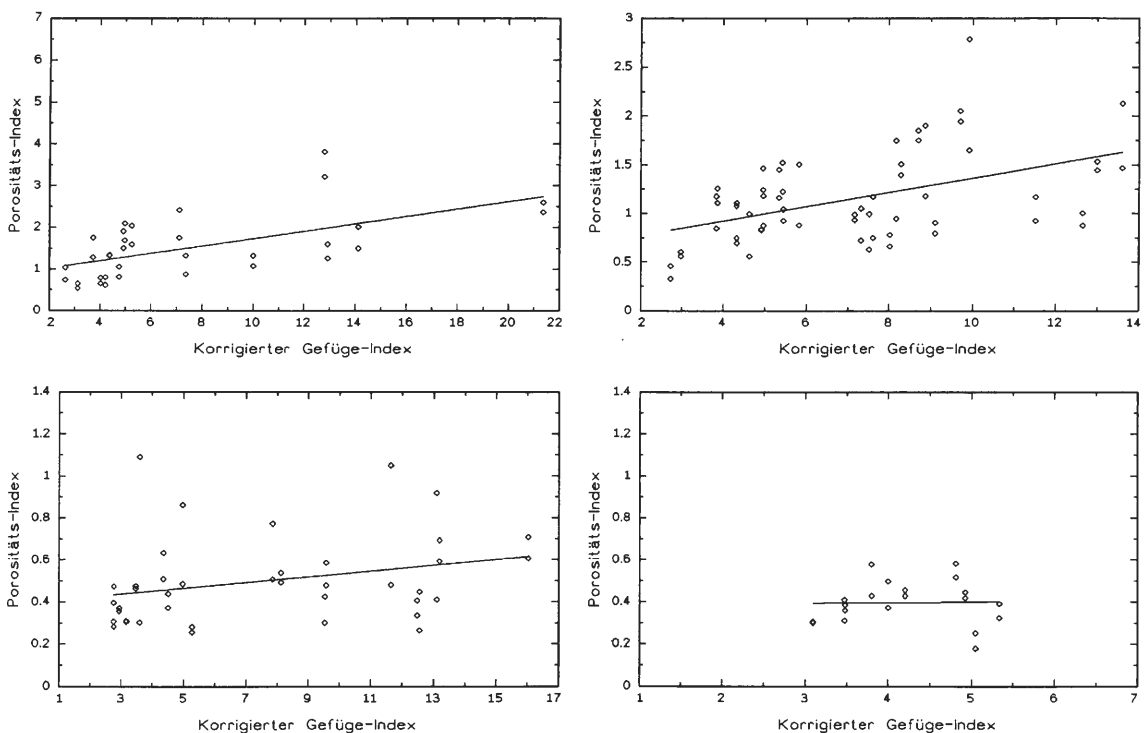


Abb. 25: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Porositäts-Index. Obere Reihe: Links Probenkollektiv S, rechts Probenkollektiv E. Untere Reihe: Probenkollektiv P. Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1), rechts nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

Sowohl der (hier nicht erfaßte) Sättigungswert als auch die nah verwandte Schurecht-Ratio wurden aufgestellt, um Aussagen über die Frostbeständigkeit zu machen. Der Umstand, daß im Untersuchungsmaterial der korrigierte Gefüge-Index mit der Schurecht-Ratio korreliert, ist ein wichtiges Indiz dafür, daß die im Gefüge-Index ausgedrückten Schäden (hauptsächlich) durch Frost entstanden (siehe auch Kap. 7.2.); denn HIRSCHWALD (1911-1912), SCHAFFER (1932: 49-50), HONEYBORNE & HARRIS (1958: 346, 352), LEARY (1981) und ROSS, HART & BUTLIN (1991: 103-105) halten den Sättigungswert - beziehungsweise die nahe verwandte Schurecht-Ratio - für ein nützliches Maß der Frostbeständigkeit poröser Baustoffe. Auch NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 14) kommen nach einer sehr ausführlichen Literaturdiskussion von Sättigungswert, Schurecht-Ratio und vergleichbaren Parametern zu der Ansicht, daß „der Grad der Wassersättigung eine entscheidende Rolle für das Verhalten beim Frostangriff“ spielt. Nur wenige Autoren - wie z. B. NAKAMURA (1988a: 1965) - halten den Grad der Wassersättigung als ungeeignet für die Feststellung der Frostbeständigkeit. HUDEC (1978b) stellte bei seiner Untersuchung von Karbonaten fest, daß die Korrelation zwischen Sättigungswert und Beständigkeit im Frost-Tau-Wechsel-Versuch (als Maß für die Verwitterungsbeständigkeit) nicht signifikant war.

Wie schon im Kapitel 2.6. ausgeführt wurde, nimmt mit zunehmender Schurecht-Ratio (bzw. Sättigungswert) nicht nur der Füllungsgrad der Poren allgemein zu, sondern auch die Anzahl an Poren, die soweit wassergefüllt sind, daß es bei ihnen im Falle eines Frostes zu Schäden käme. Da das ausdehnende Eis eine sprengende Wirkung hat, wird es zur Bildung neuer und zur Ausweitung bestehender Risse führen. Gleichzeitig muß man bedenken, daß zum einen das charakteristische Schädigungsbild der hier untersuchten Kalksteine in der Ausbildung von den Gesteinszusammenhalt zerstörenden Rissen besteht und daß zum anderen Risse die Wasserwegsamkeit enorm erhöhen und dadurch zu einer schnelleren und leichteren Wasseraufnahme führen. Bei einer Zusammenschau dieser Aspekte wird klar, daß die beobachtete Korrelation zwischen korrigiertem Gefüge-Index und freiwilliger Wasseraufnahme, Schurecht-Ratio oder Porositäts-Index (siehe Abb. 20-25) sehr gut dem Modell einer Verwitterung entspricht, in der die Frostsprengung eine große Rolle spielt. In dieses Bild fügt sich gut ein, daß die effektive Porosität nicht so gut mit dem korrigierten Gefüge-Index korreliert (siehe Abb. 19, 18b); denn die effektive Porosität besitzt keine unmittelbare Bedeutung für die Frostbeständigkeit. Eine größere Porosität kann erst dann für das Gestein nachteilig werden, wenn die Eigenschaften des Porenraumes ungünstig sind (z. B. ungünstige Schurecht-Ratio).

Es zeigen sich auffällige Parallelen zwischen dem Einfluß von Porositäts-Parametern auf die Verwitterungsbeständigkeit von dichten Kalksteinen und von gebrannten Ziegeln. Die von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977) für die Dauerhaftigkeit von Ziegeln erkannte Bedeutung der freiwilligen Wasseraufnahme läßt sich für die Probenkollektive bestätigen, ebenso wie die ebenfalls von ihnen herausgestellte Aussagekraft des „saturation coefficient“ (= Schurecht-Ratio) und die geringere Bedeutung der effektiven Porosität. Ähnliche Ergebnisse lassen sich der Arbeit von MARUSIN (1985) entnehmen. Nur WEST (1970: 108) hält „saturation coefficient“ und freiwillige Wasseraufnahme für unzureichend aussagekräftig über die Frostbeständigkeit gebrannter Ziegel.

Die nächste sich stellende Frage zielt auf die gesteinspezifischen Ursachen der gemessenen Porositätskennwerte. Da drängt sich sofort die Vermutung auf, daß Stylolithen und sparitverheilte Risse als Schwächezonen des Gesteins auch die Wasserwegsamkeit verbessern. Eine Erprobung der verschiedenen möglichen Korrelationsdiagramme (Stylolithen/sparitverheilte Risse gegen freiwillige Wasseraufnahme/effektive Porosität/Schurecht-Ratio/Porositäts-Index) bei den Probenkollektiven K, S und P erbrachte meist keine befriedigenden Korrelationen. Die sparitverheilten Risse zeigen nie eine Korrelation mit diesen Porositätskennwerten. Dieses Ergebnis wird aber verständlich, wenn man bedenkt, wie gering die Korrelation zwischen der Entwicklung sparitverheilte Risse und dem korrigierten Gefüge-Index ist.

Nur der Grad der Entwicklung von Stylolithen zeigt im Probenkollektiv K eine schwache, aber erkennbare Korrelation mit den Porositäts-Kennwerten (siehe Abb. 26-27). Doch selbst beim Korrelationsdiagramm gegen die Schurecht-Ratio (siehe Abb. 26), die die beste Korrelation zeigt, läßt sich in den Probenkollektiven S und E nur in der Regressionsgerade ein schwacher Trend erkennen, der aber in der Streubreite der Werte untergeht. Im Probenkollektiv S beruht dieses Bild auf der durchgängig schwachen Entwicklung von Stylolithen. Die Korrelation zwischen Stylolithen und Porositätskennwerten im Probenkollektiv K zeigt, daß stark entwickelte Stylolithen die Wasserwegsamkeit im Stein etwas verbessern. Deshalb schlägt sich ihre Wirkung auch am deutlichsten in der positiven Korrelation mit der Schurecht-Ratio nieder.

BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988b: 765) konnten beobachten, daß tonmineraufführende Stylolithen die Wasserwegsamkeit in einem oberkretazischen Mikrit so stark erhöhten, daß die freiwillige Wasseraufnahme in Probenwürfeln mit Stylolithen 0,5 % betrug, während sie in solchen ohne nur 0,25 % erreichte. Vergleichbares berichtet SNETHLAGE (1984: 27) vom Adneter Knollenkalk, einem mikritischen Kalk des Jura mit sehr geringer Porosität. In Kalksteinen mit sehr geringer effektiver Porosität machen sich anscheinend Stylolithen im Wasserhaushalt stärker bemerkbar als in solchen mit etwas größerer effektiver Porosität.

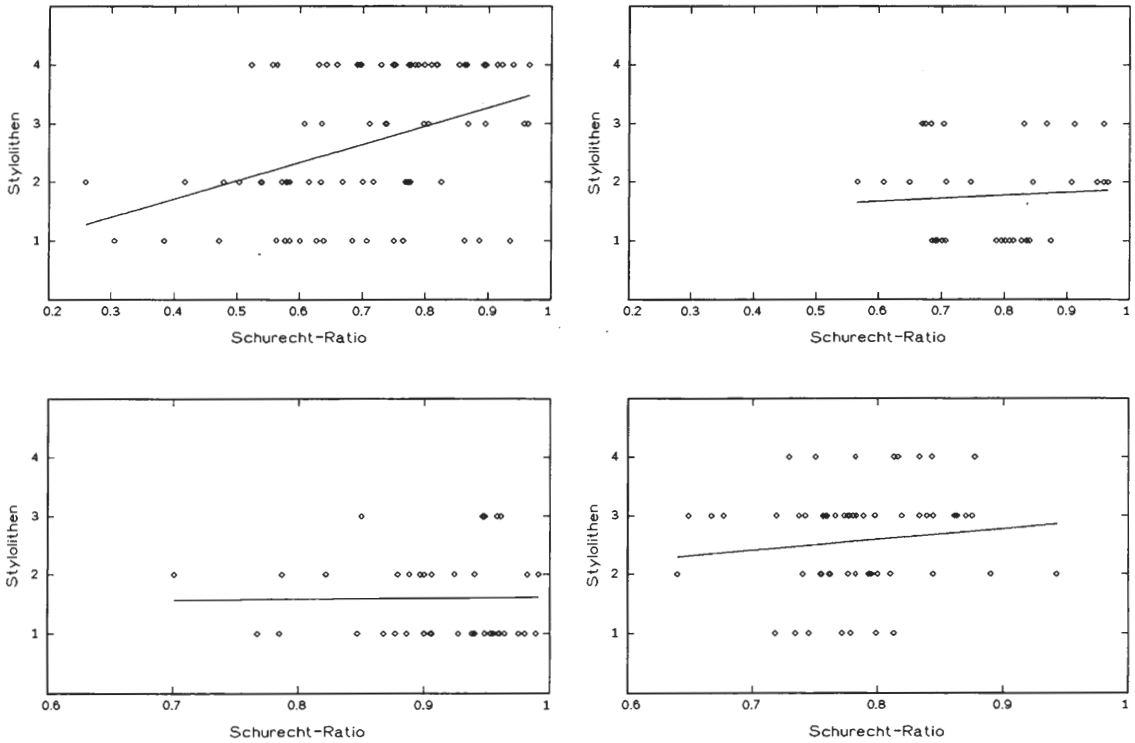


Abb. 26: Diagramme der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen. Obere Reihe: Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S. Untere Reihe: Links ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1) des Probenkollektivs P, rechts Probenkollektiv E.

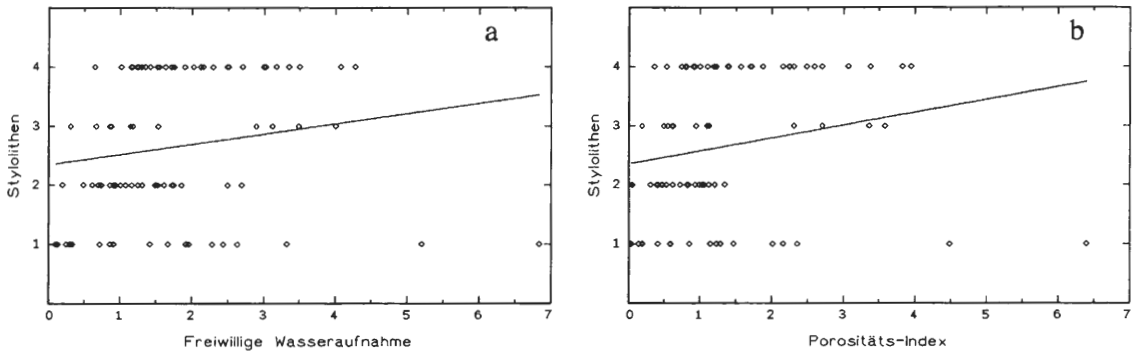


Abb. 27: Diagramm der Korrelation zwischen dem Grad der Entwicklung von Stylolithen und a) der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%), bzw. b) dem Porositäts-Index. Probenkollektiv K.

Viel besser ist bei den Probenkollektiven K und S die Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und den Porositätsparametern. Die Diagramme der Abb. 28-29 entsprechen $\pm$ weitgehend dem Korrelationsdiagramm Mikrofaziestyp gegen korrigierten Gefüge-Index (Abb. 10). Die Bilder entsprechen einander umso besser, je besser die Korrelation des jeweiligen Porositätskennwertes mit dem korrigierten Gefüge-Index ist. Die beste Korrelation in beiden Probenkollektiven zeigt der Porositäts-Index. Ein vergleichbares Bild zeigt auch die Korrelation mit dem im Kapitel 5.1. entwickelten Porositätsparameter Sättigungsdifferenz (siehe Abb. 70, Kap. 5.1.). Drei Schlüsse kann man aus den Abb. 28-29 ziehen:

- Die gemessenen Porositätskennwerte sind zumindest in einem gewissen Umfang spezifisch für den jeweiligen Mikrofaziestyp.
- Die Verwitterungsbeständigkeit der Mikrofaziestypen wird sehr stark (vielleicht sogar am stärksten) durch die gemessenen Porositätskennwerte bestimmt.

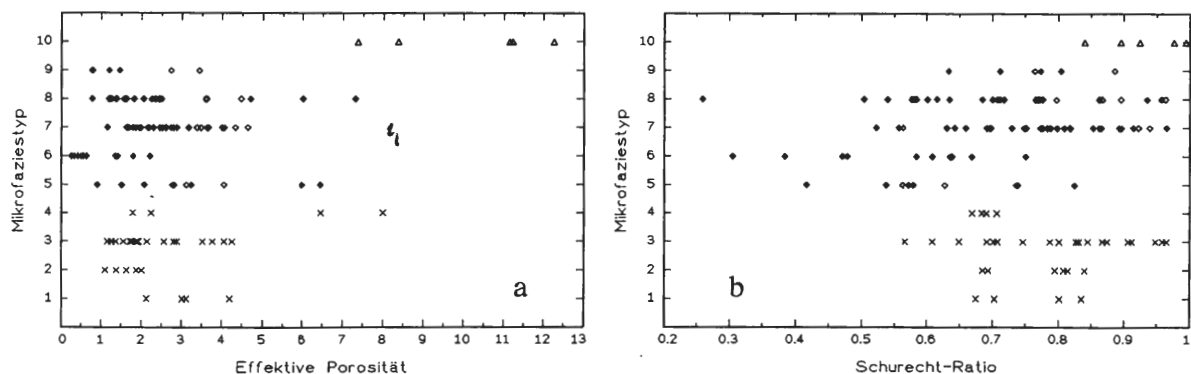


Abb. 28: Diagramme der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und a) der effektiven Porosität (in Vol.-%), bzw. b) der Schurecht-Ratio. Probenkollektive S (x) und K (◊). ♦ kennzeichnen Proben des Probenkollektivs K mit einem Dimensions-Index kleiner als 0,15. Der Mikrofaziestyp 10 wird durch Δ repräsentiert (Proben-Nr.: B10, B13, H1).

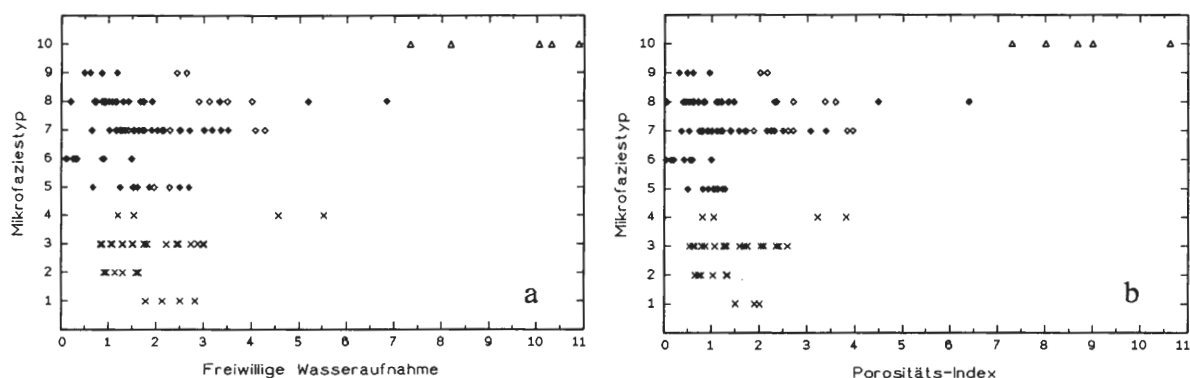


Abb. 29: Diagramme der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und a) der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%), bzw. b) dem Porositäts-Index. Probenkollektive S (x) und K (◊). ♦ kennzeichnen Proben des Probenkollektivs K mit einem Dimensions-Index kleiner als 0,15. Der Mikrofaziestyp 10 wird durch Δ repräsentiert (Proben-Nr.: B10, B13, H1).

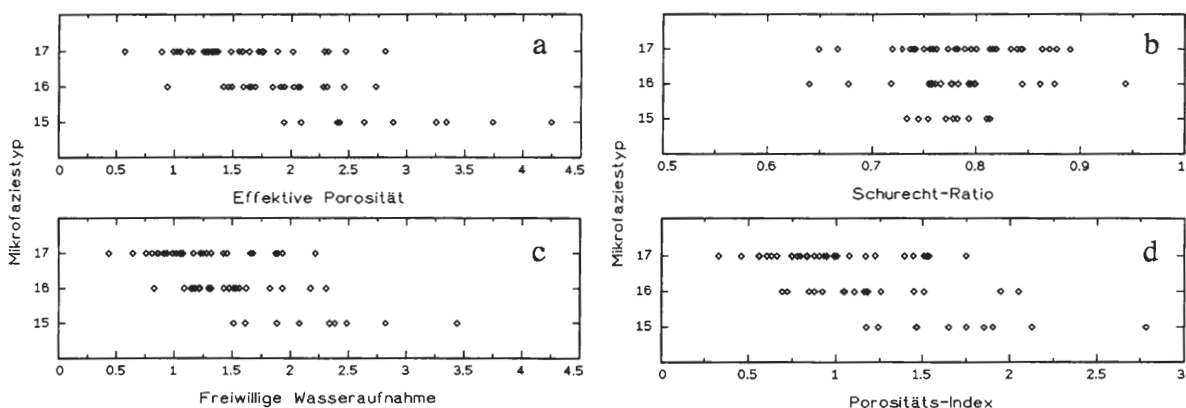


Abb. 30: Diagramme der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und a) der effektiven Porosität (in Vol.-%), b) der Schurecht-Ratio, c) der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%), bzw. d) dem Porositäts-Index. Probenkollektiv E.

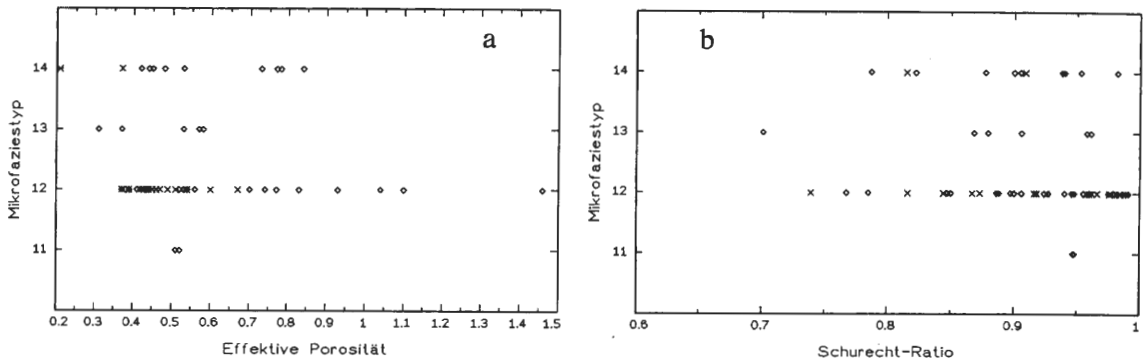


Abb. 31: Diagramme der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und a) der effektiven Porosität (in Vol.-%), bzw. b) der Schurecht-Ratio. Probenkollektiv P. ◇ = ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1); x = nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

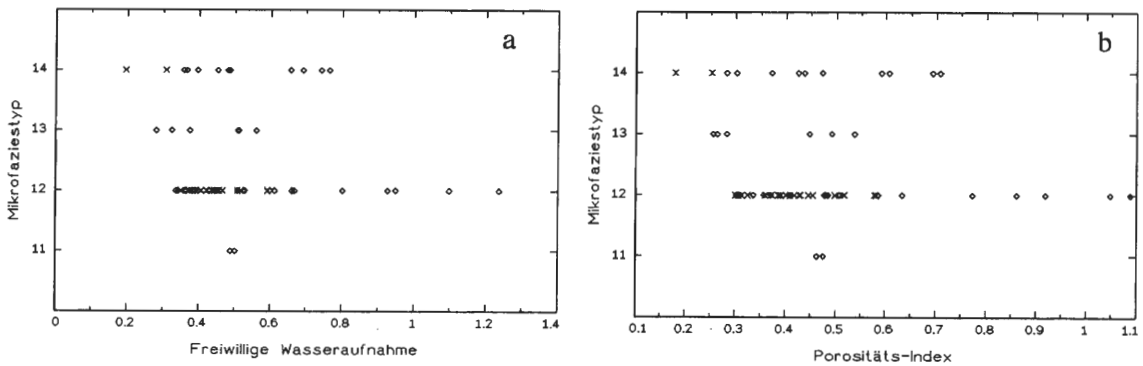


Abb. 32: Diagramme der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und a) der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%), bzw. b) dem Porositäts-Index. Probenkollektiv P. ◇ = ursprüngliche Mauersteine (= Generation 1); x = nachträglich eingebaute Mauersteine (= Generation 2).

- Die Mikrofaziestypen 2, 5 und 6 besitzen (jeweils für ihr Probenkollektiv) die größte Verwitterungsbeständigkeit.

Die verhältnismäßig geringe Porosität des Mikrofaziestyps 6 (eingeschränkt auch des Mikrofaziestyps 5) läßt sich durch die von WEISS (1987: 128) im Solnhofener Plattenkalk (Malm) gemachte Beobachtung erklären, daß durch eine enge Schichtfugensequenz die Zirkulation des Porenwasser - und damit die Zementation - weitgehend verhindert wurde, während weitständige Schichtfugen den Porenwasserfluß und damit die Zementation begünstigten. Bei der Beschreibung der Mikrofaziestypen 5-9 wurde darauf hingewiesen, daß die Mikrofaziestypen 7-9 $\pm$ deutlich laminiert sind - und dementsprechend dichtgescharte Schichtflächen zeigen -, während insbesondere der Mikrofaziestyp 6 auffällig homogen und ungeschichtet ist.

Da in die Abb. 28-29 auch die Porositätskennwerte der untersuchten Proben des Mikrofaziestyps 10 eingetragen wurden, läßt sich der Mikrofaziestyp 10 gut mit den anderen Mikrofaziestypen vergleichen. Die für ihn charakteristische Kombination einer sehr hohen freiwilligen Wasseraufnahme (immer größer als in den anderen Mikrofaziestypen!) mit einer großen Schurecht-Ratio (ihr Durchschnitt ist immer größer als in den anderen Mikrofaziestypen), bestätigt die im Kap. 4.2.2. geäußerte Vermutung, daß der Mikrofaziestyp 10 weniger verwitterungsbeständig als die Mikrofaziestypen 5-9 sein muß. Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen (siehe Kap. 4.5.) erweisen, daß sich die sehr hohe freiwillige Wasseraufnahme und die große Schurecht-Ratio des Mikrofaziestyps 10 auf die bei der Dedolomitierung entstandenen komplizierteren Kristallgrenzen und die durch die Dedolomitierung erfolgte Auflockerung des Kristallverbandes zurückführen lassen.

Im Probenkollektiv E zeigen alle Mikrofaziestypen eine vergleichbar große Schurecht-Ratio, während die freiwillige Wasseraufnahme, die effektive Porosität und der Porositäts-Index im Mikrofaziestyp 15 am größten und im Mikrofaziestyp 17 am geringsten sind (siehe Abb. 30). Da eine größere freiwillige Wasseraufnahme (bzw. eine größere effektive Porosität oder ein größerer Porositäts-Index) nachteilig für die Verwitte-

rungsbeständigkeit sind, sollte der Mikrofaziestyp 17 verwitterungsbeständiger als der Mikrofaziestyp 15 sein. Da aber Porositätsparameter und Gefüge-Eigenschaften im Probenkollektiv E antagonistisch wirken (siehe Kap. 4.2.), kann sich das nicht ausdragen.

Die Porositätskennwerte ergeben im Probenkollektiv P ein von den Probenkollektiven K und S abweichendes Bild: Zum einen ist die Streuung der Meßwerte aufgrund der sehr geringen Porosität sehr groß, zum anderen lassen sich die Mikrofaziestypen 11-14 nicht durch ihre Porositätskennwerte gut charakterisieren (siehe Abb. 31-32) und zum dritten läßt sich kein Zusammenhang zwischen den Porositätskennwerten der Mikrofaziestypen und ihrer Verwitterungsbeständigkeit erkennen (vgl. Abb. 31-32 mit Abb. 12). Vielmehr ist es so, daß nach den Porositätskennwerten eher zu erwarten gewesen wäre, daß der Mikrofaziestyp 12 etwas weniger verwitterungsbeständig wäre als der Mikrofaziestyp 14; die Korrelation mit dem korrigierten Gefüge-Index (Abb. 12) beweist aber das Gegenteil. Auch beim Mikrofaziestyp 11 ließe sich aus den nicht sonderlich günstigen Porositätskennwerten nicht auf den geringen korrigierten Gefüge-Index schließen. Aus diesen Beobachtungen darf man allerdings nicht schließen, daß die Porositätseigenschaften beim Probenkollektiv P keine Rolle für die Verwitterungsbeständigkeit spielen, denn die Abb. 17-25 belegen ihre Bedeutung; stattdessen muß man davon ausgehen, daß die Porositätseigenschaften die Verwitterungsbeständigkeit unabhängig vom Mikrofaziestyp beeinflussen, während die durchschnittliche Verwitterungsbeständigkeit der Mikrofaziestypen von anderen Faktoren determiniert wird - insbesondere dem Anteil an mikritischer Matrix (vgl. Kap. 4.2.2.).

Bei Betrachtung der Abbildungen 19-20, 24-25 und 31-32 stellt man zwei andere interessante Eigenheiten des Probenkollektivs P fest:

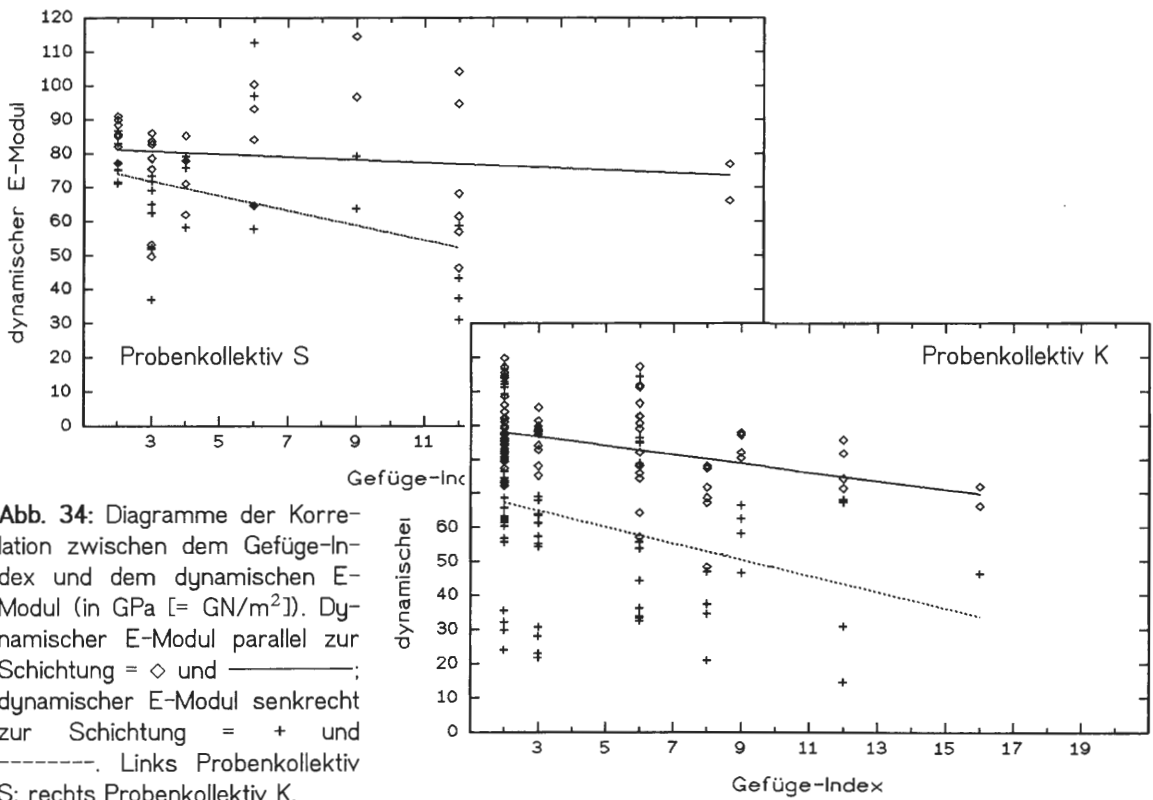
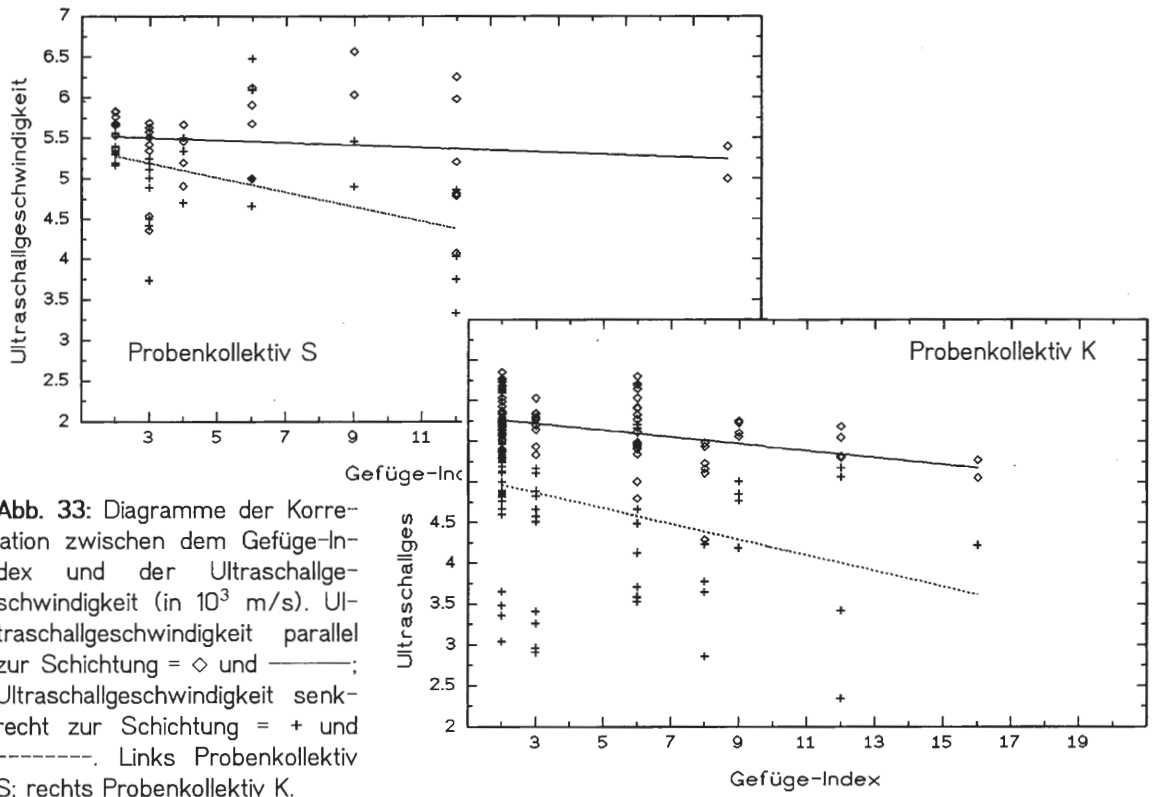
- 1) Die insgesamt sehr geringe Porosität muß im wesentlichen auf Rissen beruhen; denn anders läßt sich die durchgängig hohe bis sehr hohe Schurecht-Ratio nicht erklären. Risse schaffen wenig Raum, der sich aber sehr leicht füllen läßt.
- 2) Ein (nicht unwichtiger) Teil der Porosität ist erst während der Exposition der Mauersteine am Gebäude entstanden. Effektive Porosität, freiwillige Wasseraufnahme und Porositäts-Index - an dem man das Phänomen besonders schön sieht -, sind bei den Mauersteinen der (ursprünglich eingebauten!) Generation 1 deutlich größer als bei den (nachträglich eingebauten!) Mauersteinen der Generation 2. Während sich bei den anderen Korrelationsdiagrammen nicht ausschließen ließ, daß diese Unterschiede in den Porositätseigenschaften auf primären Materialunterschieden beruhten, lassen die Korrelationsdiagramme mit dem Mikrofaziestyp diese Möglichkeit nicht mehr zu; denn es handelt sich bei der Generation 2 um genau dieselben Mikrofaziestypen wie in der Generation 1.

Die in Punkt 2) beobachtete Porositätszunahme mit zunehmender Expositionsdauer paßt sehr gut zur Annahme in 1), daß die Porosität im wesentlichen auf Rissen beruht. Wichtig ist, sich zu vergegenwärtigen, daß die Porositätskennwerte an Proben aus dem Kern des Mauersteins ermittelt wurden. Im Verlauf der Exposition der Mauersteine ist also die Anzahl und/oder Größe der Risse im gesamten Mauerstein größer geworden. Auch hier zeigt sich, daß Rißbildung eine sehr wichtige Rolle bei der Verwitterung von Kalksteinen spielt.

4.4. Ergebnisse der Ultraschall-Untersuchungen

Als erstes Ergebnis der Ultraschall-Untersuchungen fällt auf, daß sich die Anisotropie der Kalksteine in diesen Untersuchungen sehr deutlich zeigt; denn Ultraschallimpuls-Geschwindigkeit und dynamischer E-Modul (= Elastizitäts-Modul) sind senkrecht zur sedimentären Schichtung durchgängig geringer als parallel dazu (siehe Abb. 33-34). Auch QUEISSER, PLATEN & FÜRST (1985: 81) beobachteten bei ihrer Untersuchung von Sandsteinen, daß die Ultraschallimpuls-Geschwindigkeiten senkrecht zur Schichtung geringer waren als parallel dazu.

Die gemessenen Werte für den dynamischen E-Modul (= Elastizitäts-Modul) mit ca. 40-110 GPa [= GN/m²] sind für Natursteine verhältnismäßig hoch, wie ein Blick auf die Zusammenstellungen von PESCHEL (1977: 94-95) und MIRWALD (1987a: 955) zeigt. Demgegenüber ist der dynamische E-Modul von Sandsteinen mit 6-71 GPa meist erheblich geringer. Aus dieser Beobachtung heraus läßt sich der auffällige Unterschied erklären, daß bei Sandsteinen oberflächliche bzw. oberflächennahe Verwitterungsprozesse dominieren, während für die Verwitterung der in dieser Arbeit untersuchten Kalksteine die Ausbildung von Rissen, die den Stein durchziehen, charakteristisch ist. Bei einem Gestein mit geringem dynamischem E-Modul führen Spannungen direkt an der Stelle, an der sie auftreten, zu Schädigungen und werden dabei abgebaut. Demgegenüber verhält sich ein Gestein mit großem dynamischem E-Modul viel starrer: Die Spannungen werden im Gestein viel weiter geleitet und können, wenn sie groß genug sind, an ganz anderen Stellen im



Stein zu Schäden führen. Spannungszustände, die an der Gesteinsoberfläche durch Frost, Temperaturschwankungen oder Schwankungen des Wassergehaltes hervorgerufen werden, erzeugen nach diesem Modell in Gesteinen mit geringem dynamischem E-Modul Oberflächenschäden, während sie in Gesteinen mit großem dynamischem E-Modul bevorzugt zu (lang aushaltenden) Rissen führen (vgl. Kap. 7.2., Abb. 94). Daß bei den zur Rißbildung neigenden Gesteinen die Spannungen (zumindest zu einem überwiegenden Teil) von der Oberfläche ausgehen, zeigt sich z. B. daran, daß nicht selten die Risse nahe der Außenseite des Mauersteins häufiger und besser entwickelt sind als im Rest des Mauersteins. Dieses Modell erklärt auch gut, warum der von CANER & TÜRKMEENOGLU (1985) beschriebene Basalt ebenso wie die hier beschriebenen Kalksteine bevorzugt durch die Bildung von (lang aushaltenden) Rissen verwittert, obwohl beide Gesteinstypen sich drastisch in ihrer Petrographie unterscheiden; denn Basalte haben mit 48-105 GPa (PESCHEL 1977: 94; MIRWALD 1987a: 955) einen vergleichbar großen dynamischen E-Modul wie die Kalksteine der Probenkollektive K und S. [Eine weitere Bestätigung liefert eine von Herrn Dr. G. Hilbert (FH Münster) am 2.10.1992 gegebene mündliche Mitteilung: Zum Bau des Wiener Stephansdom wurden hauptsächlich die tertiären Leithakalke verwandt (siehe KIESLINGER 1949, 1932: 199ff.). Nur selten ist ein Steinaustausch notwendig bei diesen $\pm$ stark porösen Kalksteinen mit einem dynamischen E-Modul von 20-30 GPa. Die Mitarbeiter der Dombauhütte beobachteten an den ausgetauschten Steinen keine Risse!]

Die Auswertung der Messungen mit dem Ultraschallimpuls-Laufzeit-Verfahren bestätigte die im Kapitel 2.7. geäußerte Erwartung, daß Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul mit zunehmender Schädigung des Mauersteins abnehmen. Die Abb. 33-34 zeigen deutlich, daß zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit (bzw. dem dynamischen E-Modul) und dem Gefüge-Index eine negative Korrelation besteht. Beide Abbildungen zeigen aber ebenso deutlich, daß die Streubreite der Werte sehr groß ist. Die Korrelation ist viel zu ungenau, um den Verwitterungszustand eines Mauersteins festzustellen. Damit erfüllt diese Methode nicht die in sie gesetzte Hoffnung, einen präziseren und objektiveren Ersatz für den Gefüge-Index zu liefern. Trotzdem wurde versucht, etwaige aufschlußreiche Korrelationen zu anderen Gesteinsparametern zu entdecken. Es stellte sich aber heraus, daß der gemessene dynamische E-Modul weder mit der Häufigkeit von Stylolithen oder sparitverheilten Rissen noch mit dem Dimensions-Index korreliert. Da die durchgeführten Ultraschall-Untersuchungen keine zur Beurteilung des Verwitterungszustandes nutzbaren Ergebnisse erbrachten, wurde im weiteren (bei der Untersuchung der Probenkollektive P und E) auf sie verzichtet.

Es stellt sich nun die Frage, warum die Ergebnisse der Ultraschall-Untersuchungen so unbefriedigend sind. Ein nicht zu vernachlässigender Effekt besteht in der geringen durchschallten Länge, die im vorliegenden Material 4-5 cm beträgt, während KNÖFEL & SCHUBERT (1990: 12) die Verwendung von 16 cm langen Prismen empfehlen. Das ist beim vorliegenden Material aus den im Kapitel 2.4. erläuterten Gründen nicht möglich. Eine andere wichtige Erklärung liefert die Feststellung von KRÜML (1980), daß Mikrorisse nur einen sehr begrenzten Effekt auf den dynamischen E-Modul haben.

Zum Abschluß des Kapitels über die Ultraschall-Untersuchungen muß noch erwähnt werden, daß Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul sehr gut mit der Trockenrohichte, der freiwilligen Wasseraufnahme und der effektiven Porosität korrelieren. Dies bedeutet nicht, daß Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul vielleicht bessere Parameter für den Verwitterungszustand der Mauersteine darstellen als der Gefüge-Index; denn die Ultraschallgeschwindigkeit im Gestein wird sehr stark durch die Porenhohlräume (bzw. ihren Anteil am Gestein) beeinflusst. Demgegenüber ist die Korrelation zwischen der für die Verwitterungsbeständigkeit sehr wichtigen Schurecht-Ratio und der Ultraschallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen E-Modul z. T. sehr schlecht, denn die Schurecht-Ratio hängt sehr viel mehr von der Form und der Größe der Porenhohlräume als von ihrer Häufigkeit ab.

4.5. Ergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen

Als Pilotversuch wurden 11 Proben aus den Probenkollektiven S und K sowie eine Probe der Gelbkalke aus dem Steinbruch im Botanischen Garten Osnabrück in der im Kapitel 2.8. beschriebenen Weise präpariert und untersucht. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, daß jeder der unterschiedenen Mikrofaziestypen 1-10 durch mindestens eine Probe repräsentiert wurde. Beim Durchführen der Untersuchungen stellte sich sehr schnell heraus, daß die (technisch bedingte) Größe der Proben viel zu gering ist, um auch nur ansatzweise repräsentativ für einen größeren Teil eines Mauersteins oder gar den ganzen Mauerstein zu sein. Auf dieses Problem weist auch WEISS (1992: 78) hin. Dadurch wird es unsinnig, von jedem Mauerstein eine Probe rasterelektronenmikroskopisch untersuchen und die Ergebnisse danach statistisch auszuwerten zu wollen.

Der Pilotversuch zeigte zwar, daß die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung bestimmte Gesteins-eigenschaften erkennen läßt und Aussagen über einzelne Aspekte des Verwitterungsprozesses erlaubt; aber

diese Aussagen sind ziemlich allgemeiner Art. Außerdem lassen sich die verschiedenen Mikrofaziestypen mit dem Rasterelektronenmikroskop bei weitem nicht so gut wie mit lichtmikroskopischen Methoden unterscheiden. Deshalb konnte bei den Probenkollektiven P und E auf rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen verzichtet werden.

Ganz allgemein zeigte sich, daß man die Geometrie des Porenraums in diesen Kalksteinen nicht mit der von Sandsteinen vergleichen kann. Während der Porenraum von Sandsteinen aus Zwickelhohlräumen mit im Idealfall $\pm$ isometrischer Gestalt besteht, wird in den untersuchten Kalksteinen im Idealfall der Porenraum $\pm$ ausschließlich aus mikroskopisch kleinen Rissen von sehr großer flächiger Ausdehnung, aber sehr geringer Breite aufgebaut. Deshalb ist m. E. das in der Auswertung von Messungen mit dem Quecksilber-Pososimeter verwandte Zylinderporen-Modell für die hier untersuchten Kalksteine noch weniger geeignet als für Sandsteine. Neben den porosimetrischen Problemen ergeben sich aus der Porengeometrie auch Auswirkungen auf die Verwitterung und Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen, da sich Risse und $\pm$ isometrische Poren in ihrem mechanischen Verhalten deutlich voneinander unterscheiden (siehe z. B.: WALSH & BRACE 1966; DELGADO RODRIGUES 1988: 34-35).

Für die mikritischen Kalke ist charakteristisch, daß die Matrix nicht aus Mikrit (im strengen Sinne) mit einer Kristallgröße von 1-4 mm, sondern aus Mikrospatit mit einer Kristallgröße von 4-10 mm gebildet wird (Taf. 9 Fig. 2). Derartige Mikrospatite sind weit verbreitet und werden auf eine diagenetische Rekristallisation zurückgeführt (FLÜGEL 1982: 84, 108-110). Taf. 9 Fig. 2 zeigt, daß die Mikrospatit-Kristalle in flächigem Kontakt direkt aneinandergrenzen; Zwickelporen sind ausgesprochen selten, und der allergrößte Teil der Porosität entsteht durch Mikrorisse (unterschiedlicher Dimension), die $\pm$ entlang von Kristallgrenzen verlaufen. Ein vergleichbares Bild zeigen auch die Zemente aus blockigem Spatit - nur um einige Dimensionen größer (Taf. 9 Fig. 1). In mikritischen Kalken kann der Porenraum dadurch erweitert werden, daß von größeren Mikrorissen ausgehend eine Hohlraumbildung - vermutlich durch Lösungsprozesse - und eine Gefüge-Auflockerung in der Umgebung erfolgt (Taf. 9 Fig. 4).

Desweiteren ließen sich z. B. in intensiv gelb gefärbten Gesteinen des Osnabrücker Wellenkalks (vgl. Kap. 4.2.1., Mikrofaziestyp 10) durch Dedolomitisierung entstandene Kalzitkristalle beobachten (Taf. 11 Fig. 1, Fig. 2). Sie lassen sich leicht an den miteinander verzahnten, sehr unregelmäßigen Kristallgrenzen erkennen, die durch die Ersetzung kleinerer Dolomit-Kristalle durch größere Kalzit-Kristalle entstehen (FÜCHTBAUER & RICHTER 1988: 418). Wahrscheinlich wird durch die komplizierteren Kristallgrenzen die kapillare Saugkraft - und damit die Schurecht-Ratio - der Dedolomite erhöht. Die mit den Dedolomitisierungsprozessen verknüpfte - und im rasterelektronenmikroskopischen Bild erkennbare - Auflockerung des Kristallverbandes (durch das Ersetzen von Kristallen und Lösungsprozesse) sollte zu einer Erhöhung der Porosität führen. Diese Überlegungen werden dadurch bestätigt, daß für den Mikrofaziestyp 10 die Kombination einer sehr hohen freiwilligen Wasseraufnahme mit einer großen Schurecht-Ratio charakteristisch ist (siehe Kap. 4.3.).

In fast allen Proben ließen sich mikroskopisch kleine Risse beobachten. Diese Mikrorisse lassen sich über kürzere oder längere Strecken verfolgen. Meist verlaufen sie entlang von Korngrenzen (bzw. Kristallgrenzen) (siehe z. B. Taf. 9 Fig. 2 + 4, Taf. 10 Fig. 2 + 4). Vergleichbares beobachteten LEWIN & CHAROLA (1978: 696-697) und WINKLER (1988: 719) bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung von angewitterten Kalksteinen und Marmoren, wofür SAGE (1988) auch ein mathematisches Modell liefert. In einzelnen Fällen (Taf. 9 Fig. 3, Taf. 10 Fig. 2) kann man erkennen, daß ein oder mehrere Mikrorisse von einem blattförmigen Tonmineral-Korn ausgegangen sind, es ist jedoch nicht der Regelfall. Diese Beobachtungen bestätigen aber die von LEWIN & CHAROLA (1981) beim rasterelektronenmikroskopischen Untersuchen von Marmor erkannte Förderung des frostbedingten Steinzerfalls durch die Wasser zurückhaltende Wirkung plattiger oder fibröser Minerale.

In anderen Fällen gehen Mikrorisse anscheinend von Kalzit-Kristallen aus, die erheblich größer sind als die Kristalle in ihrer Umgebung (Taf. 10 Fig. 3) - möglicherweise spielt dabei die große Anisotropie der Wärmeausdehnung beim Kalzit eine Rolle (vergleiche dazu: DREYER 1974: 108; KRAUS 1988: 144; WEISS 1992: 40; SAGE 1988; KÖHLER 1988: 657; SNETHLAGE & SIMON 1992: 22). Desweiteren können auch die in wechselndem Umfang spatitgefüllten Drusen, die im Mikrofaziestyp 10 verbreitet auftreten, der Ausgangspunkt von Rissen sein (Taf. 10 Fig. 4).

Gelegentlich läßt sich beobachten, daß Kristallflächen, die an einem Mikroriß liegen, korrodiert sind (Taf. 10 Fig. 1). Diese Korrosionsspuren zeigen, daß diese Risse schon zur Zeit des Einbaus im Mauerwerk dem Wasser zugänglich waren und nicht erst durch die Präparation entstanden - vergleichbare Anlösungsspuren an Mikrorissen beschreiben LEWIN & CHAROLA (1978: 696, Abb. 3-5) aus dem oberflächennahen Bereich verschiedener Kalksteine. Im Probenkollektiv S ließen sich sogar mehrfach pflanzliche Geflechte (vermutlich Pilzmyzelien) auf Rißflächen beobachten (Taf. 11 Fig. 4). Diese pflanzlichen Geflechte zeigen große Ähnlichkeit zu den von KRUMBEIN & SCHÖNBORN-KRUMBEIN (1987a) aus Naturbausteinen beschriebenen Pilzen und Actinomyceten. Auch sie beweisen, daß der Riß nicht erst durch die Präparation entstand. Das Auftreten von Pilzmyzelien oder anderen pflanzlichen Geflechten in Mauersteinen des Probenkollektivs S überrascht nicht, da auf der beprobten Brüstungsmauer Erde lag und Büsche wuchsen. Korrosionsspuren

und pflanzliche Besiedlung zeigen, daß es sich um Dauerbrüche im Sinne von KIESLINGER (1932: 129-134) handelt. Allerdings wurde nie die von KIESLINGER (1932: 131) erwähnte Verfärbung des Dauerbruchs durch Ruß beobachtet. Ebenso wenig ließ sich die von KETTELHACK (1992: 71-72) aus dem Baumberger Sandstein (= ein Kalksandstein der Oberkreide) beschriebene Bildung von Gipskristallen in den Mikrorissen für die untersuchten Kalksteine nachweisen.

Eine auffällige Ausnahme bezüglich der Risse war die Probe des Mauersteins K 41 (die Repräsentantin des Mikrofaziestyps 6): In ihr wurden keine lang durchhaltenden Mikrorisse beobachtet. Stattdessen waren die wenigen auftretenden Risse kurz und gingen oft durch Kristalle (bzw. Körner) (Taf. 11 Fig. 3). Dieser Umstand belegt, daß in dieser Probe - anders als in den anderen Proben - die Verbindung zwischen den Kristallen (bzw. Körnern) sehr fest ist und Kristall- oder Korngrenzen keine nennenswerte Rolle als Schwächezonen spielen. Möglicherweise beruht darauf die besondere Verwitterungsbeständigkeit des Mikrofaziestyps 6 zu einem Teil.

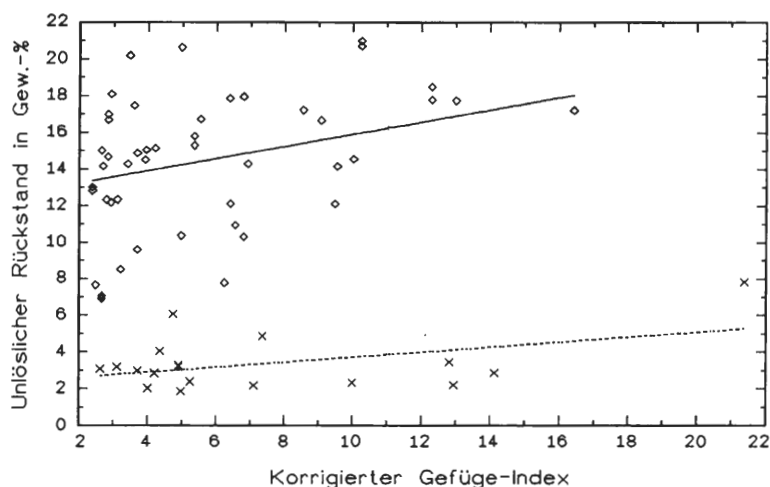


Abb. 35: Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem salzsäureunlöslichen Rückstand (in Gew.-%). Probenkollektiv K = $\diamond$ und —; Probenkollektiv S = x und - - - - -.

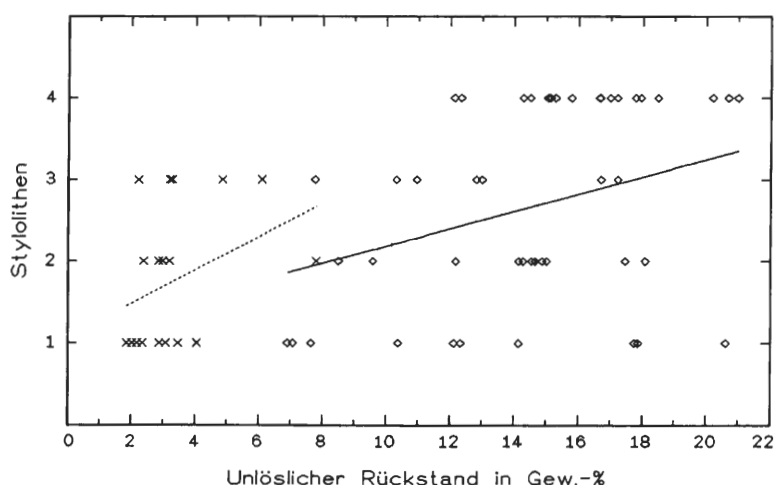


Abb. 36: Diagramm der Korrelation zwischen dem salzsäureunlöslichen Rückstand (in Gew.-%) und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen.

Probenkollektiv K = $\diamond$ und —; Probenkollektiv S = x und - - - - -.

4.6. Ergebnisse der geochemischen Untersuchungen

4.6.1. Salzsäureunlöslicher Rückstand

Die aufschlußreichsten Ergebnisse der geochemischen Untersuchungen liefern die Messungen des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand. Es zeigt sich nämlich im Korrelationsdiagramm Abb. 35, daß in den Probenkollektiven K und S mit zunehmendem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand der korrigierte Gefüge-Index zunimmt - also die Verwitterungsbeständigkeit abnimmt. Trotz der großen Streubreite läßt sich dieser Trend im Probenkollektiv K zweifelsfrei erkennen. Im Probenkollektiv S ist die Korrelation weitaus weniger deutlich, was sich aber durch den erheblich geringeren Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und durch die kleine Probenanzahl erklären läßt.

Der salzsäureunlösliche Rückstand besteht - nach der optischen Auswertung der Gesteinsdünnschliffe und des salzsäureunlöslichen Rückstands selbst zu urteilen - (fast) ausschließlich aus Quarz, Feldspat und Tonmineralen. Die im hier bearbeiteten Material erkennbare negative Korrelation zwischen dem salzsäureunlöslichen Rückstand und der Verwitterungsbeständigkeit wurde auch schon von anderen Autoren bei Karbonatgesteinen beobachtet (z. B.: DE QUERVAIN 1945: 42; ESBERT et al. 1981; ESBERT, ORDAZ & SUÁREZ DEL RIO 1983: 248; HUDEC 1980; FASSINA & CHERIDO 1985; NIJS 1985: 15; ORDAZ & ESBERT 1985; NIJS, DE GEYTER & FOBE 1988: 113; DUTTLINGER & KNÖFEL 1989: 102; ČICHOVSKY 1990; NIJS & DE GEYTER 1991: 671; SIMPER 1991: 25; HILBERT 1991: 141; KETTELHACK 1992: 89, 92). Zu ihrer Erklärung läßt sich folgendes heranziehen:

- Quellfähige Tonminerale können durch ihre großen Volumenänderungen beim Wechsel zwischen feucht und trocken den Gesteinszusammenhalt zerstören (siehe z. B.: DE QUERVAIN 1945: 42, 1967: 141, 185; DELGADO RODRIGUES 1976; BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES 1988a: 83, 1988b: 765, 769; SNETHLAGE 1984: 27; ESBERT et al. 1983: 248; FASSINA & CHERIDO 1985: 314; ČICHOVSKY 1990: 199-201; NIJS 1991: 61, 63; ROSSI-MANARESI et al. 1992: 569; GROBE et al. 1993: 1233).
- LEWIN & CHAROLA (1981) konnten durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen erkennen, daß plattige oder fibröse Kristalle und Kristall-Aggregate, wie sie für Tonminerale und einige andere Silikate charakteristisch sind, durch Kapillarkräfte Wasser in intra- und interkristallinen Räumen festhalten und so zu verstärkten Frostschäden führen können.
- Die Silikate und Quarz, aus denen der salzsäureunlösliche Rückstand aufgebaut ist, können durch ihre Anwesenheit die Löslichkeit von Karbonaten erleichtern. Zum einen erzeugen ihre Körner (bzw. Kristalle und Aggregate) beim Einwirken wässriger Lösungen um sich herum Zonen, in denen diese Lösungen einen von der Umgebung abweichenden Chemismus haben. Zum anderen können die Kristalle (bzw. Aggregate) von Schichtsilikaten eine Art „Löschblatt-Effekt“ hervorrufen, der die Lösung der Karbonate erleichtert.
- Schichtsilikate können die Wirkung der Luftverschmutzung auf die Gesteinsverwitterung verstärken, indem sie Sulfat absorbieren und als Katalysatoren der Gipsbildung wirken (WEBER 1985: 530-531; LIVINGSTON 1988: 436).
- Silikate sind eine notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Stylolithen in Karbonatgesteinen. Im Probenkollektiv K und im Probenkollektiv E besteht deshalb eine erkennbare positive Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen (siehe Abb. 36). Die Stylolithen sind aber (zumindest im Probenkollektiv K) auch positiv mit dem korrigierten Gefüge-Index korreliert (siehe Kap. 4.2.3.).
- Der salzsäureunlösliche Rückstand (insbesondere die Tonminerale) behindert mit zunehmender Konzentration immer mehr die Zementation und die Sammelkristallisation von Kalziumkarbonat (siehe z. B.: BAUSCH 1968).
- HUDEC (1980) konnte durch experimentelle Untersuchungen nachweisen, daß ein Kalkstein mit großem Gehalt an Al_2O_3 und SiO_2 (= Indikatoren für den salzsäureunlöslichen Rückstand) eine große Wärmeausdehnung im trockenen Zustand zeigt und eine größere innere Oberfläche besitzt (mit zunehmender innerer Oberfläche nimmt die Feuchtigkeitsabsorption zu). Dieses Verhalten kann zum Steinerfall beitragen.
- DELGADO RODRIGUES (1988: 36-38) stellte fest, daß in Kalksteinen mit zunehmendem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand sowohl die Aufnahme von Wasser aus feuchter Luft als auch die Volumenvergrößerung bei Lagerung unter Wasser (= Schwellen) zunehmen. Beide Eigenschaften sind für die Verwitterungsbeständigkeit prinzipiell nachteilig.
- LIVINGSTON (1988: 436) weist darauf hin, daß Schichtsilikate durch ihre Anwesenheit im Gestein Punkte mechanischer Schwäche erzeugen. Obwohl bei Kalksteinen mit einem ziemlich geringen Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand nur schwer vorstellbar ist, daß dadurch die Verwitterungsbeständigkeit in erkennbarer Weise vermindert werden kann, könnte dieser Aspekt bei einer ausgeprägt inhomogenen Verteilung der Schichtsilikate eine Rolle spielen.

Im Probenkollektiv P zeigen weder die Mauersteine der Generation 1 noch die der Generation 2 eine klare Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem salzsäureunlöslichen Rückstand. Für das Probenkollektiv E gilt vergleichbares. Das mag zu einem Teil daran liegen, daß in beiden Probenkollektiven der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ähnlich niedrig wie im Probenkollektiv S ist. Das reicht aber zur Erklärung nicht ganz aus, denn im Probenkollektiv S deutet sich die Korrelation trotzdem an. Im Probenkollektiv E ist diese Korrelation wahrscheinlich deshalb nicht erkennbar, weil sie durch das antagonistische Zusammenwirken von Mikrofaziestyp-Eigenschaften und Porositätsparametern überdeckt wird (siehe Kap. 4.2.2. und 4.3.). Für das Probenkollektiv P sind zwei andere Aspekte wichtig:

- Die Kalksteine des Probenkollektivs P stammen aus dem Devon des variszisch deformierten Grundgebirges und sind deshalb erheblich stärker (bei höheren Temperaturen und Drücken) und länger diagenetisch überprägt worden als die aus der Trias des Deckgebirges stammenden Kalke des Probenkollektivs S. Mit zunehmender Diagenese wandeln sich aber quellfähige Tonminerale in nicht quellfähige um, so daß eine Schädigung durch Quellen unwahrscheinlicher wird. Es liegen dazu umfangreiche Untersuchungen an Ton- und Siltsteinen vor (HELING 1988: 209-211).
- Im Probenkollektiv P ist die Porosität erheblich geringer als im Probenkollektiv S; aber wichtige Schadensmechanismen des salzsäureunlöslichen Rückstands sind an die Anwesenheit von Wasser gebunden (siehe oben).

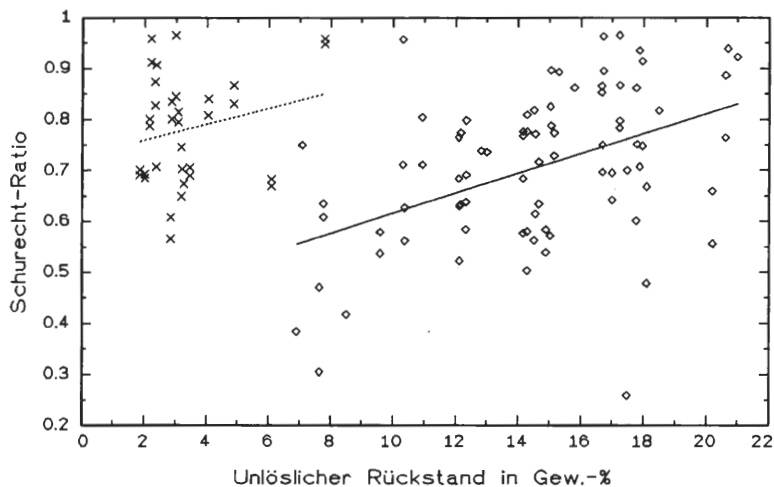


Abb. 37: Diagramm der Korrelation zwischen dem salzsäureunlöslichen Rückstand (in Gew.-%) und der Schurecht-Ratio. Probenkollektiv K = $\diamond$ und —; Probenkollektiv S = x und - - - - -.

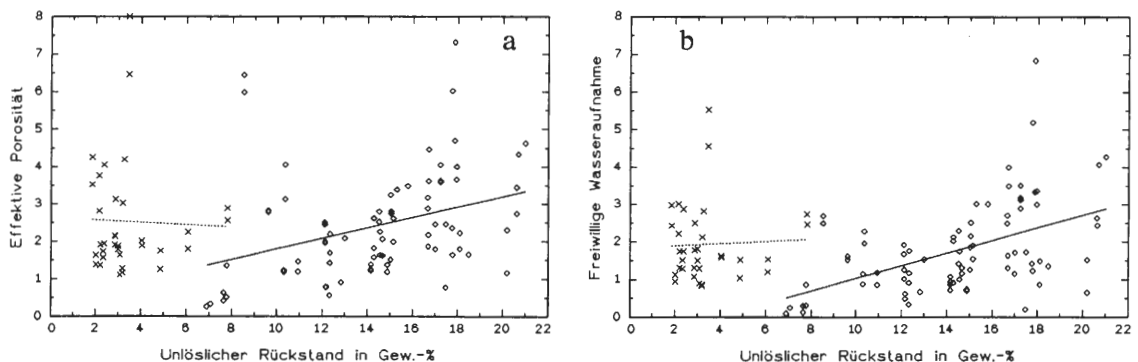


Abb. 38: Diagramme der Korrelation zwischen dem salzsäureunlöslichen Rückstand (in Gew.-%) und a) der effektiven Porosität (in Vol.-%), bzw. b) der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%). Probenkollektiv K = $\diamond$ und —; Probenkollektiv S = x und - - - - -.

In den Probenkollektiven P und E zeigt sich keine Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und den Porositätskennwerten. Ebenfalls läßt sich im Probenkollektiv P keine klare Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und dem Mikrofaziestyp oder dem Grad der Entwicklung von Stylolithen erkennen (siehe Abb. 40).

Wenn man sich die Beziehungen zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und den Porositäts-Parametern ansieht (Abb. 37-38), stellt man zuerst eine Korrelation zwischen dem salzsäureunlöslichen Rückstand und der Schurecht-Ratio fest, die im Probenkollektiv K deutlich erkennbar und im Probenkollektiv S ansatzweise erkennbar ist. Man könnte versuchen, diese Korrelation als die Wirkung der Kombination der positiven Korrelation zwischen dem salzsäureunlöslichen Rückstand und der Häufigkeit von Stylolithen (Abb. 36) mit der positiven Korrelation zwischen der Häufigkeit von Stylolithen und der Schurecht-Ratio (Abb. 26) zu erklären. Da aber sowohl die Korrelation zwischen salzsäureunlöslichem Rückstand und Stylolithen als auch die Korrelation zwischen Stylolithen und Schurecht-Ratio $\pm$ schwach ist, reicht das m. E. nicht zur Erklärung der Korrelation zwischen dem salzsäureunlöslichen Rückstand und der

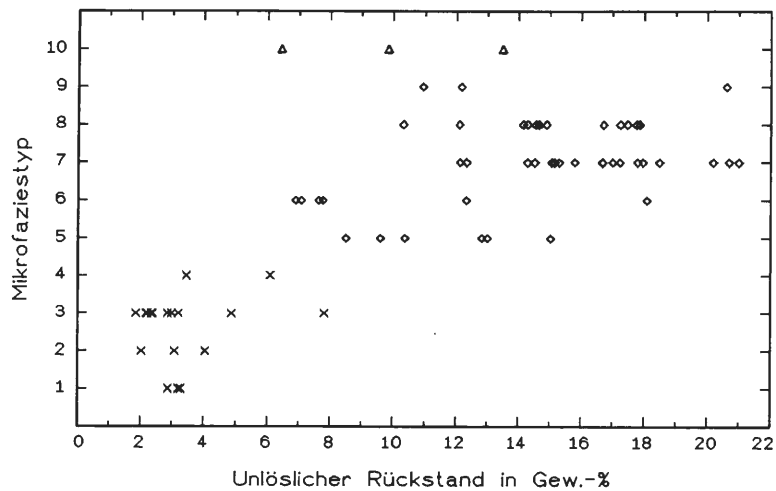


Abb. 39: Diagramm der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und dem salzsäureunlöslichen Rückstand (in Gew.-%). Probenkollektiv K = $\diamond$; Probenkollektiv S = x; Proben des Mikrofaziestyps 10 (Proben-Nr.: B10, B13, H1) = $\triangle$.

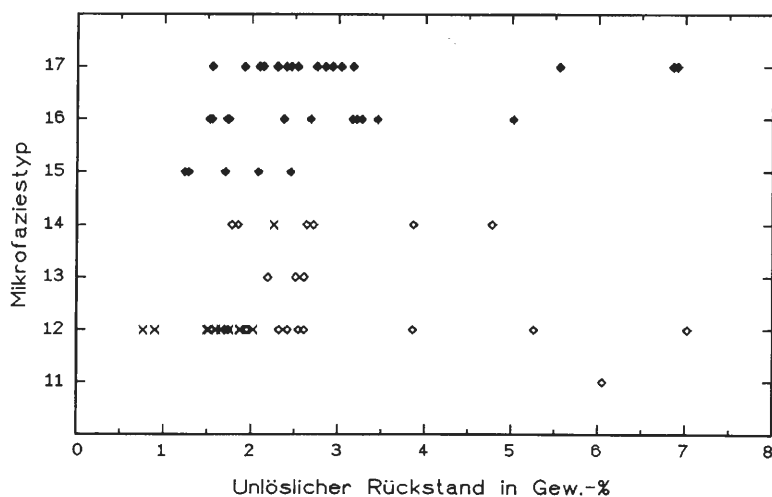


Abb. 40: Diagramm der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und dem salzsäureunlöslichen Rückstand (in Gew.-%). Probenkollektiv E = $\blacklozenge$. Probenkollektiv P: Generation 1 (ursprünglich eingebaute Mauersteine) = $\diamond$; Generation 2 (nachträglich eingebaute Mauersteine) = x.

Schurecht-Ratio aus. Anscheinend wird durch die Anwesenheit von Silikaten im Kalkstein die Wasseraufnahme erleichtert. Diese Vermutung wird auch dadurch gestützt, daß zwischen salzsäureunlöslichem Rückstand und freiwilliger Wasseraufnahme sowohl im Probenkollektiv K als auch im Probenkollektiv S eine positive Korrelation besteht, die besser ist als die Korrelation zwischen salzsäureunlöslichem Rückstand und effektiver Porosität (Abb. 38). Wie groß die Bedeutung der Verbesserung der Wasseraufnahme durch einen größeren Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand für die Korrelation zwischen der Verwitterungsbeständigkeit und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ist, läßt sich noch nicht sicher abschätzen - man sollte diesen Zusammenhang aber nicht vernachlässigen. Es ist auch noch nicht völlig klar, worauf dieser Effekt beruht, aber es läßt sich vermuten, daß die Tonminerale dabei eine große Rolle spielen.

Im Rahmen dieser Auswertung interessiert auch die Korrelation mit dem Mikrofaziestyp (siehe Abb. 39-40). Der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand unterscheidet sich in den beiden Probenkollektiven K und S gravierend und ist zur Unterscheidung beider Kalksteine geeignet. Die große Differenz erklärt sich aus den jeweiligen Sedimentationsbedingungen. Bemerkenswert ist, daß die verwitterungsbeständigeren Mikrofaziestypen 5 und 6 durchschnittlich einen geringeren Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand haben als die weniger verwitterungsbeständigen Mikrofaziestypen 7 bis 9 (siehe Abb. 39). In diesem Zusammenhang muß man sich bewußt machen, daß die Tempestit-Bank, auf der die mikrofaziale Einstufung des Mauersteins als Mikrofaziestyp 5 oder 6 beruht, nur einen $\pm$ kleinen Teil des gesamten Mauersteins umfaßt, und daß deshalb auch Material der „Normal-Sedimentation“ (=Mikrofaziestyp 7-9) in die geochemische Analyse mit eingeht. Punkte, in denen die Tempestit-Bänke von der Normal-Sedimentation geochemisch abweichen, können deshalb verfälscht werden; das heißt, daß man mit noch größeren Unterschieden rechnen müßte, wenn man nur die Sedimente des jeweiligen Mikrofaziestyps - und nicht die Mauersteine - miteinander vergleichen würde.

Auch BACKHAUS & FLÜGEL (1971: 206-207) beobachteten im Unteren Muschelkalk des Odenwaldes relativ geringe Gehalte an salzsäureunlöslichem Rückstand in Schillkalken und relativ hohe Gehalte in Flaserkalken (vergleichbar Mikrofaziestyp 7-8). In den Probenkollektiven S, P und E ist der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ziemlich gering und zeigt keine ausgeprägten Korrelationen mit dem Mikrofaziestyp. Nur im Probenkollektiv E deutet sich zaghafte eine Zunahme des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand vom Mikrofaziestyp 15 zum Mikrofaziestyp 17 an - gleichsinnig mit der Zunahme des Mikrit-Gehaltes.

4.6.2. Salzsäurelöslicher Gesteinsanteil

Am Atomemissionsspektrometer (ICP-AES) wurden die Konzentrationen der Hauptelemente Kalzium, Magnesium und Eisen und der Spurenelemente Natrium, Kalium, Strontium, Barium, Aluminium und Mangan im salzsäurelöslichen Gesteinsanteil der Probenkollektive K und S gemessen. Zuerst erfolgt die statistische Auswertung der Hauptelemente Kalzium, Magnesium und Eisen.

Ganz allgemein läßt sich feststellen, daß die Konzentrationen der Hauptelemente Kalzium, Magnesium und Eisen keine engeren Beziehungen zur Verwitterungsbeständigkeit zeigen. Die negative Korrelation zwischen dem Kalzium-Gehalt und dem korrigierten Gefüge-Index, die in Abb. 41 für beide Probenkollektive K und S dargestellt ist, zeigt zum einen eine große Streubreite und läßt sich zum anderen leicht erklären: Da in Kalksteinen mit geringem Magnesium-Gehalt - wie in den Probenkollektiven K und S - naturgemäß der Kalzium-Gehalt gegenläufig zum Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ist, ist es zu erwarten, daß eine positive Korrelation zwischen salzsäureunlöslichem Rückstand und korrigiertem Gefüge-Index sich auch als negative Korrelation zwischen Kalzium-Gehalt und korrigiertem Gefüge-Index ausdrückt.

Als noch weniger aussagekräftig erweist sich der Magnesium-Gehalt. Die Regressionsgeraden für die Probenkollektive K und S deuten in Abb. 42 Korrelationen mit dem korrigierten Gefüge-Index an. Die eine wäre aber positiv und die andere negativ, was sich nur schwer erklären ließe. Bei genauerer Betrachtung der Einzelmessungen stellt man fest, daß in jedem der beiden Probenkollektive fast alle Proben einen ähnlichen Magnesium-Gehalt besitzen. Nur wenige Proben mit stark abweichendem Magnesium-Gehalt verändern den Verlauf der Regressionsgeraden sehr stark. Diese Erscheinung kann man nicht durch Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Meßlösungen erklären, da das Verhältnis Magnesium-Gehalt/Kalzium-Gehalt dasselbe Bild zeigt wie der Magnesium-Gehalt (siehe Abb. 43, 41). Die einzige Erklärung ist, daß bei den Probenkollektiven K und S der Magnesium-Gehalt - und somit auch der Dolomit-Gehalt - keine Rolle für die Verwitterungsbeständigkeit spielt. Das ist sehr verständlich, da die gemessenen Magnesium-Gehalte sehr gering sind - sie liegen meist zwischen 0,25 und 1,5 Gew.-%.

Wenn also - wie NIESEL (1979: 91-92) und ROSS, HART & BUTLIN (1991: 102) annehmen - ein höherer Dolomit-Gehalt (bzw. Magnesium-Gehalt) die Verwitterungsbeständigkeit (aufgrund der größeren Löslich-

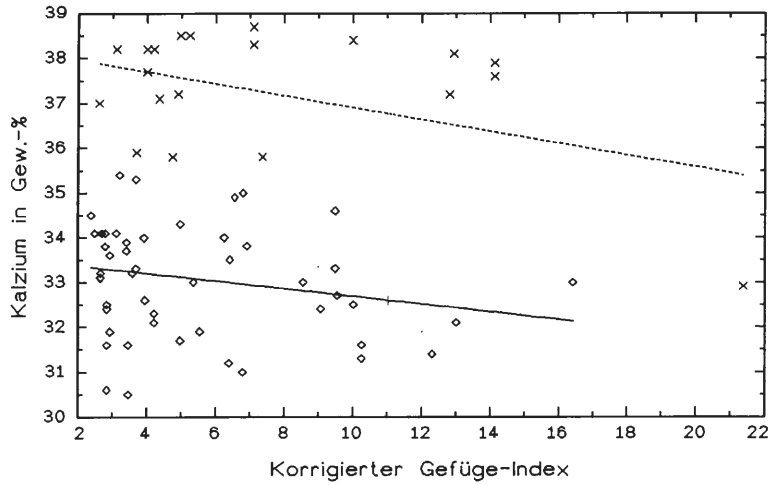


Abb. 41: Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Kalzium-Gehalt (in Gew.-%). Probenkollektiv K = $\diamond$ und —; Probenkollektiv S = x und -----.

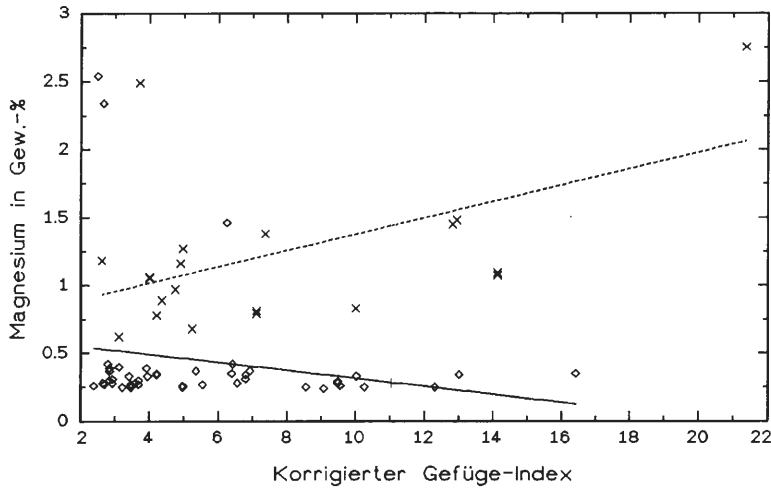


Abb. 42: Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Magnesium-Gehalt (in Gew.-%). Probenkollektiv K = $\diamond$ und —; Probenkollektiv S = x und -----.

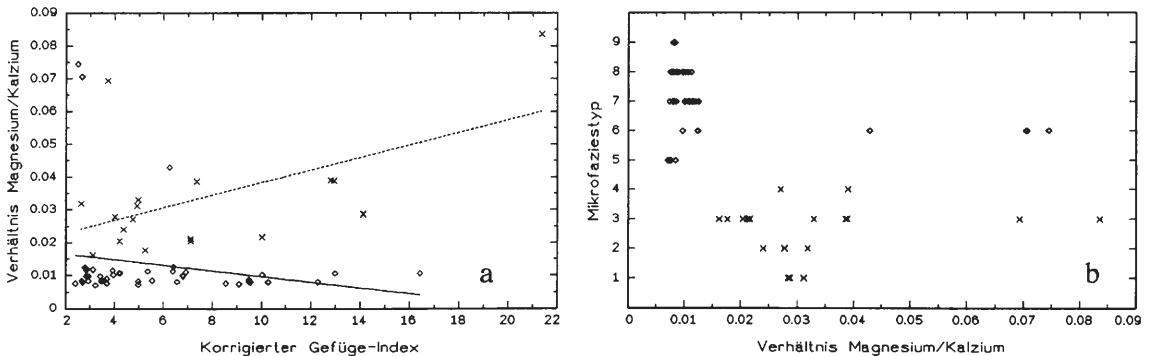


Abb. 43: Diagramme der Korrelation zwischen dem Verhältnis Magnesium-Gehalt/Kalzium-Gehalt und a) dem korrigierten Gefüge-Index, bzw. b) dem Mikrofaziestyp. Probenkollektiv K = $\diamond$ und —; Probenkollektiv S = x und -----.

keit von Magnesiumsulfat im Vergleich zu Kalziumsulfat) vermindert, dann kann dieser Aspekt erst bei erheblich größeren Magnesium-Gehalten zum Tragen kommen. HARVEY et al. (1974: 9; 1978: 9) konnten zwar bei den von ihnen untersuchten Karbonatgesteinen eine schwache Korrelation zwischen Dolomit-Gehalt und Beständigkeit im Kristallisationstest (als Maß für die Verwitterungsbeständigkeit) feststellen, aber die Trends sind nur schwer zu deuten: Bei Kalksteinen (< 50 % Dolomit) führte ein erhöhter Dolomit-Gehalt zu (tendenziell) geringerer Beständigkeit, während in Dolomitsteinen (> 50 % Dolomit) eine Erhöhung des Dolomit-Gehaltes die Beständigkeit (tendenziell) verbesserte - wobei die silurischen Dolomitsteine einen

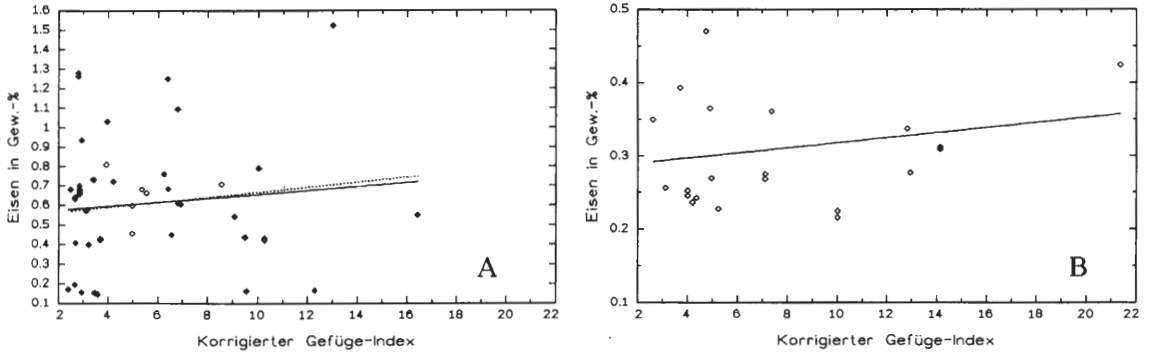


Abb. 44: Diagramme der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Eisen-Gehalt (in Gew.-%). **A)** Gesamtes Probenkollektiv K = $\diamond$ und ———; $\blacklozenge$ und - - - - - stehen für Proben mit einem Dimensions-Index kleiner als 0,15. **B)** Probenkollektiv S.

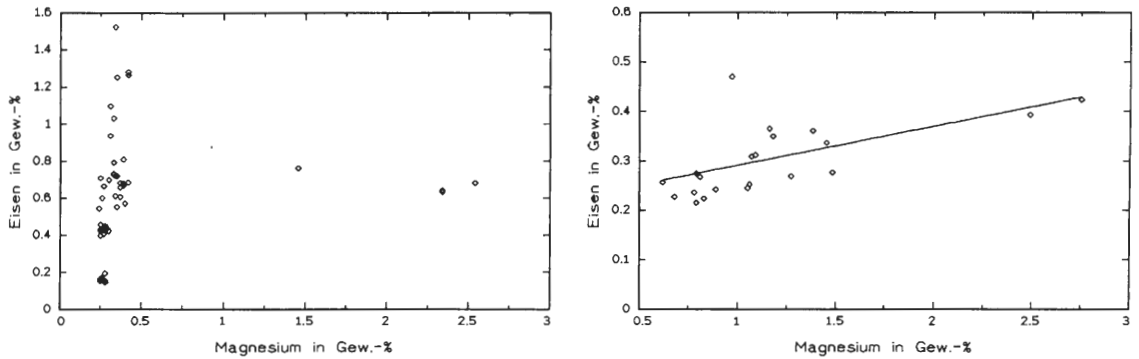


Abb. 45: Diagramme der Korrelation zwischen dem Magnesium-Gehalt (in Gew.-%) und dem Eisen-Gehalt (in Gew.-%). Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S.

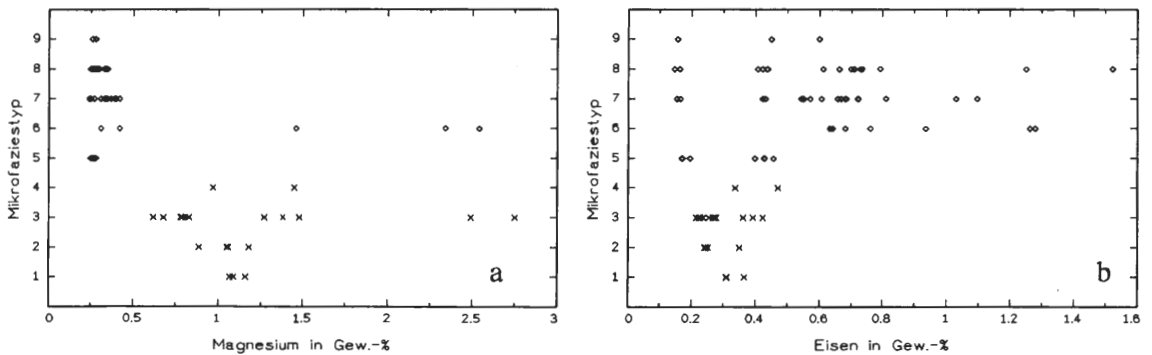


Abb. 46: Diagramme der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und a) dem Magnesium-Gehalt (in Gew.-%), bzw. b) dem Eisen-Gehalt (in Gew.-%). Probenkollektiv K = $\diamond$; Probenkollektiv S = $\times$.

anderen Trend zeigten als die ordovizischen (HARVEY et al. 1974: 9). Auch die Angaben über die Veränderungen des Dolomit- (bzw. Magnesium-) Gehaltes in der oberflächlichen Verwitterungszone - die in kausalem Zusammenhang mit der Verwitterungsbeständigkeit von Dolomit stehen müssen - sind widersprüchlich: Während LUKAS (1990: 171) in der Mehrzahl der Fälle eine geringfügige bis beträchtliche Magnesium-Anreicherung in der Verwitterungszone beobachtete, stellten GORETZKI, SEIDEL & STEINER (1987: 71) das Gegenteil fest.

Auch der Eisen-Gehalt zeigt keine Korrelation mit dem korrigierten Gefüge-Index (siehe Abb. 44). Auffällig ist allerdings die sehr große Streubreite zwischen 0,15 und 1,5 Gew.-% im Probenkollektiv K. Wenn man dann den Eisen-Gehalt gegen den Magnesium-Gehalt abträgt, wie es in Abb. 45 erfolgt ist, stellt man fest, daß sich das Eisen in den beiden Probenkollektiven vollkommen unterschiedlich verhält: Im Probenkollektiv S besteht eine sehr deutliche positive Korrelation zwischen dem Eisen-Gehalt und dem Magnesium-Gehalt. Daraus resultiert für das Probenkollektiv S zum einen, daß Magnesium und Eisen auf die gleiche Weise im Gestein gebunden waren - vermutlich in eisenhaltigen Dolomiten [einen vergleichbaren Einbau von Fe^{2+} statt Mg^{2+} nimmt LANGER (1989: 60, 88) bei Dolomiten des Unteren Muschelkalks an] -, und zum anderen, daß die gemessenen Eisen-Gehalte die primären Eisen-Gehalte des salzsäurelöslichen Anteils widerspiegeln. Demgegenüber zeigen die Eisen-Gehalte im Probenkollektiv K keine Korrelation mit dem Magnesium-Gehalt des Gesteins. Offensichtlich ist also der Eisen-Gehalt des salzsäurelöslichen Anteils in zahlreichen Steinen des Probenkollektivs K durch sekundäre Prozesse verändert worden. Als Erklärung bietet sich dafür an: Sulfidisch gebundenes Eisen (z. B. Pyrit), das durch Salzsäure nur schwer und in geringem Umfang gelöst werden kann, wird durch (mit Verwitterungsprozessen verknüpfte) wässrige Lösungen in Eisenhydroxide umgewandelt, die erheblich leichter durch Salzsäure gelöst werden können. Diese Erklärung wird dadurch gestützt, daß LANGER (1989: 87-88) an unverwitterten Bohrkern-Proben aus dem Unteren und Mittleren Muschelkalk beobachten konnte, daß ein Teil des Eisens als feinverteilter Pyrit vorlag.

Im Rahmen der Diskussion der geochemischen Parameter interessiert auch ihre Korrelation mit dem Mikrofaziestyp (siehe Abb. 43b, 46). Bei den Magnesium-Gehalten (siehe Abb. 43, 46a) läßt sich erkennen, daß sie in den Mikrofaziestypen 1-4 des Probenkollektivs S zwar sehr stark streuen, aber durchgängig größer als in den Mikrofaziestypen 5 und 7-9 des Probenkollektivs K sind. Die Magnesium-Gehalte der Mikrofaziestypen 1-4 entsprechen gut den von RÖHL (1990b: Abb. 5) für vergleichbare Gesteinstypen des norddeutschen Oberen Muschelkalks angegebenen Gehalten. Die Mikrofaziestypen 5 und 7-9 haben auffällig konstante Magnesium-Gehalte; nur die Mauersteine mit dem Mikrofaziestyp 6 zeigen stark schwankende und z. T. erheblich erhöhte Magnesium-Werte. Da der Mikrofaziestyp 6 durch Sturmflut-Ereignisse entstandene Detritus-Wackestones umfaßt, dürften die erhöhten Magnesium-Gehalte aus dem Detritus stammen (z. B. durch sturmflutbedingte Aufarbeitung supra- bis intertidaler Dolomite). Der Eisen-Gehalt (siehe Abb. 46b) ist im Probenkollektiv S meist deutlich geringer und zeigt eine erheblich geringere Variationsbreite als im Probenkollektiv K, aber sämtliche Werte bewegen sich in dem von RÖHL (1990b: Abb. 5) für den norddeutschen Oberen Muschelkalks ermittelten Rahmen. Eine Abhängigkeit des Eisen-Gehaltes vom Mikrofaziestyp läßt sich nicht erkennen. Bemerkenswert ist nur der Unterschied im Eisen-Gehalt zwischen dem Mikrofaziestyp 5 und dem Mikrofaziestyp 6, da diese Verteilung der des Mangan-Gehaltes entspricht.

Die Konzentrationen der Spurenelemente Natrium, Kalium, Strontium, Barium, Aluminium und Mangan sowie die von MEDUNA & BAUSCH (1985) als geochemisch aussagekräftig erachteten Verhältnisse Kalzium-Gehalt/Eisen-Gehalt und Mangan-Gehalt/Strontium-Gehalt im salzsäurelöslichen Gesteinsanteil wurden unter drei Gesichtspunkten statistisch ausgewertet:

- 1) Gibt es eine Korrelation mit dem korrigierten Gefüge-Index? Ist dieser Parameter als geochemischer Indikator für die Verwitterungsbeständigkeit geeignet?
- 2) Gibt es eine Korrelation mit dem salzsäureunlöslichen Rückstand? Ist dieser Parameter als geochemischer Indikator für diesen, die Verwitterungsbeständigkeit beeinflussenden Faktor geeignet?
- 3) Gibt es eine Korrelation mit dem Mikrofaziestyp? Ist dieser Parameter als geochemischer Indikator zur mikrofaziellen (bzw. genetischen) Unterscheidung geeignet?

Die statistische Auswertung zeigte, daß zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gehalt an Natrium, Strontium und Mangan sowie dem Verhältnis Kalzium-Gehalt/Eisen-Gehalt keine Korrelationen bestehen. Eine positive Korrelation erkennt man nur zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gehalt an Aluminium sowie an Kalium, wobei die Korrelation mit dem Aluminium-Gehalt (Abb. 47) besser als die Korrelation mit dem Kalium-Gehalt ist. Die Erklärung für diese Korrelation ist sehr einfach, denn sowohl der Aluminium-Gehalt als auch der Kalium-Gehalt korrelieren positiv mit dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (siehe Abb. 48). Der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand korreliert aber positiv mit dem korrigierten Gefüge-Index. Daß die Korrelation zwischen korrigiertem Gefüge-Index und Aluminium-Gehalt sowie Kalium-Gehalt nur auf der Korrelation zwischen korrigiertem Gefüge-Index und Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand beruht, läßt sich daran erkennen, daß beim Aluminium-Gehalt nicht nur die Korrelation zum korrigierten Gefüge-Index, sondern auch die Korrelation zum Gehalt an salz-

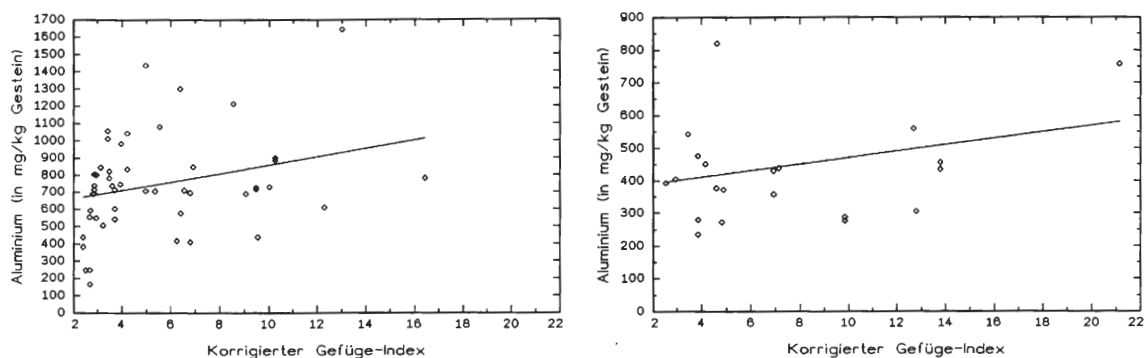


Abb. 47: Diagramme der Korrelation zwischen dem Aluminium-Gehalt (in mg/kg Gestein) und dem korrigierten Gefüge-Index. Links Probenkollektiv K, rechts Probenkollektiv S.

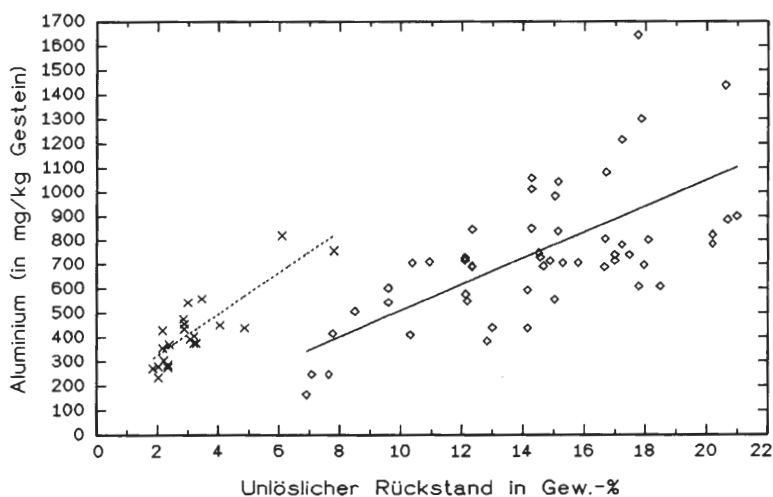


Abb. 48: Diagramm der Korrelation zwischen dem Aluminium-Gehalt (in mg/kg Gestein) und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%).

Probenkollektiv K = ◇ und —————; Probenkollektiv S = x und - - - - -.

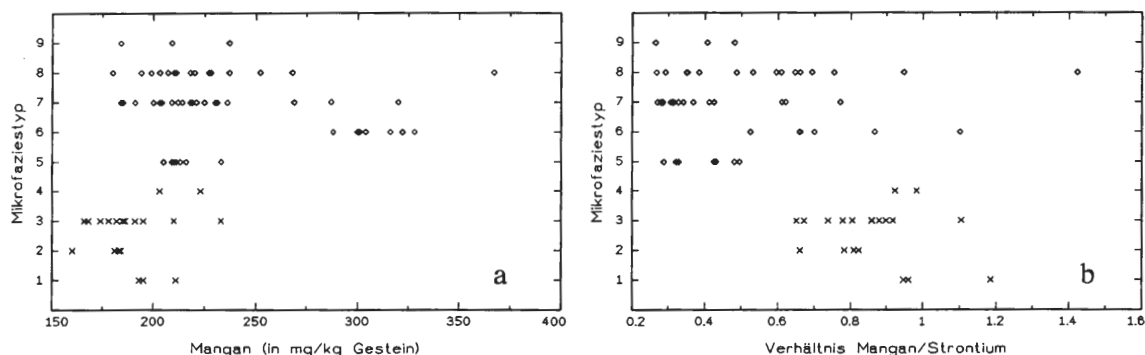


Abb. 49: Diagramme der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und a) dem Mangan-Gehalt, bzw. b) dem Verhältnis Mangan-Gehalt/Strontium-Gehalt. Probenkollektiv K = ◇; Probenkollektiv S = x.

säureunlöslichem Rückstand besser als beim Kalium-Gehalt sind. Auch bei HUDEC (1980: 500, 504) läßt sich die positive Korrelation zwischen Aluminium-Gehalt und Materialverlust im Frost-Tau-Wechselversuch ohne Schwierigkeiten auf den Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand in den untersuchten Kalksteinen zurückführen. Die positive Korrelation des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand mit dem Aluminium-Gehalt (Abb. 48) ist so gut, daß der Aluminium-Gehalt als guter Indikator für den relativen Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand gelten kann. Diese Korrelation ist nicht erstaunlich, denn für das Aluminium ist geochemisch gesehen „kein Platz“ im von Karbonaten dominierten salzsäurelöslichen Teil des Kalksteins. Das im salzsäurelöslichen Teil gemessene Aluminium muß deshalb aus etwas angelösten Feldspäten und Tonmineralen stammen. Vergleichbares gilt für das Kalium. Auch THIELE (1990: 62) weist auf die hohe positive Korrelation zwischen dem Kalium-Gehalt und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand hin (der Aluminium-Gehalt wurde von ihr nicht untersucht).

Die Gehalte von Natrium, Strontium, Barium und Mangan sowie das Verhältnis Mangan-Gehalt/Strontium-Gehalt im salzsäurelöslichen Teil des Kalksteins korrelieren nicht mit dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand.

Die von BAUSCH & POLL (1984: 364-365) und MEDUNA & BAUSCH (1985: 64) beobachtete Korrelation zwischen dem Strontium-Gehalt und dem Tonmineral-Gehalt zeichnet sich im hier untersuchten Material sehr schwach ab; denn nur beim Vergleich der beiden Probenkollektive K und S ist eine positive Korrelation zwischen dem Strontium-Gehalt und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand deutlich erkennbar (siehe Tabelle 1).

Darüber hinaus ermöglicht Tabelle 1 einen Vergleich mit den von RÖHL (1990b: Abb. 5) für verschiedene Gesteinstypen des norddeutschen Oberen Muschelkalks angegebenen Element-Gehalten (außer Barium). Wenn man die Konzentrationen der untersuchten Spurenelemente Natrium, Kalium, Strontium, Barium, Aluminium und Mangan sowie die Quotienten Kalzium-Gehalt/Eisen-Gehalt und Mangan-Gehalt/Strontium-Gehalt im salzsäurelöslichen Teil gegen den Mikrofaziestyp abträgt, stellt man fest, daß - bis auf wenige Ausnahmen - keiner dieser geochemischen Parameter signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Mikrofaziestypen eines Probenkollektivs zeigt. Die Ausnahmen sind der Mangan- und der Strontium-Gehalt sowie der daraus resultierende Quotient, die sich bei den Mikrofaziestypen 5 und 6 zwar innerhalb der Variationsbreite des gesamten Probenkollektivs K bewegen, sich aber zwischen den Mikrofaziestypen 5 und 6 deutlich unterscheiden (siehe Abb. 49). Dies ist umso auffälliger, da beide Mikrofaziestypen eine vergleichbare Genese haben und im Dünnschliff-Bild Übergänge zueinander zeigen. Trotzdem darf man annehmen, daß diese Unterschiede eine gewisse Konstanz und fazielle (bzw. stratigraphische) Signifikanz besitzen, da RÖHL (1990a: 19, Abb. 4) beim Mangan-Gehalt im Oberen Muschelkalk stratigraphisch auswertbare Horizonte erkennen konnte. Dieser geochemischen Unterschiede lassen sich entweder durch das erheblich häufigere Auftreten primär aragonitischer Muschelschalen im Mikrofaziestyp 5 oder durch primären Unterschiede des Sediments erklären. Allerdings erlauben sämtliche erhobenen geochemischen Parameter keine sichere Entscheidung zwischen beiden Hypothesen.

Die meisten geochemischen Korrelationsdiagramme zeigen keine auffällige Abhängigkeit vom Mikrofaziestyp. Selbst die Kombination der in der Literatur erfolgreich verwandten Parameter Verhältnis Kalzium/Eisen und Verhältnis Mangan/Strontium in Abb. 50 bringt keinen durchgreifenden Erfolg: Zwar werden Mikrofaziestyp 5 und 6 sauber voneinander getrennt, aber das war nach dem Korrelationsdiagramm Verhältnis Mangan/Strontium gegen Mikrofaziestyp (Abb. 49b) vorauszusehen. Bei allen anderen Mikrofaziestypen erbringt es keine befriedigende Trennung. Trotzdem sind zwei Punkte am Korrelationsdiagramm Verhältnis Kalzium/Eisen gegen Verhältnis Mangan/Strontium (Abb. 50) hervorzuheben: Zum einen zeigt sich eine ausgeprägte negative Korrelation zwischen beiden Quotienten, zum anderen ist eine säuberliche Trennung der beiden Probenkollektive voneinander möglich. Beides sieht man besonders gut bei einer Darstellung mit logarithmischen Achsen. Die negative Korrelation zwischen beiden Quotienten läßt sich dadurch erklären, daß es mit fortschreitender Diagenese - parallel zur Verarmung an Strontium und zur Anreicherung von Mangan - zu einer Anreicherung von Eisen im Verhältnis zum Kalzium kam (vgl. z. B.: WEDEPOHL 1970; BRAND & VEIZER 1980; BRUCKSCHEN 1992).

Eine bessere geochemische Unterscheidung der verschiedenen Mikrofaziestypen erlaubt das Korrelationsdiagramm Verhältnis Mangan/Strontium gegen Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (Abb. 51). Hier sieht man nicht nur eine scharfe Trennung der Mikrofaziestypen 5 und 6 voneinander, sondern auch eine Abgrenzung des Mikrofaziestyps 7 gegen den Mikrofaziestyp 8 sowie eine Abgrenzung des Mikrofaziestyps 2 gegen die Mikrofaziestypen 1 und 4 sind (zumindest ansatzweise) möglich.

Da die oben beschriebenen Ansätze einer geochemischen Charakterisierung (und Abgrenzung) der verschiedenen Mikrofaziestypen nur unbefriedigende Ergebnisse erbrachten, wurde schließlich der Versuch unternommen, mittels einer Clusteranalyse der chemischen Zusammensetzung des salzsäurelöslichen Anteils die Probenkollektive und die verschiedenen Mikrofaziestypen voneinander zu trennen. Dieser Versuch ließ einen größeren Erfolg erhoffen, da THIELE (1990: 68-70) die von ihr im Rahmen ihrer Untersuchung des Unteren Muschelkalks unterschiedenen Mikrofaziestypen in einer Clusteranalyse der erhobenen geochemi-

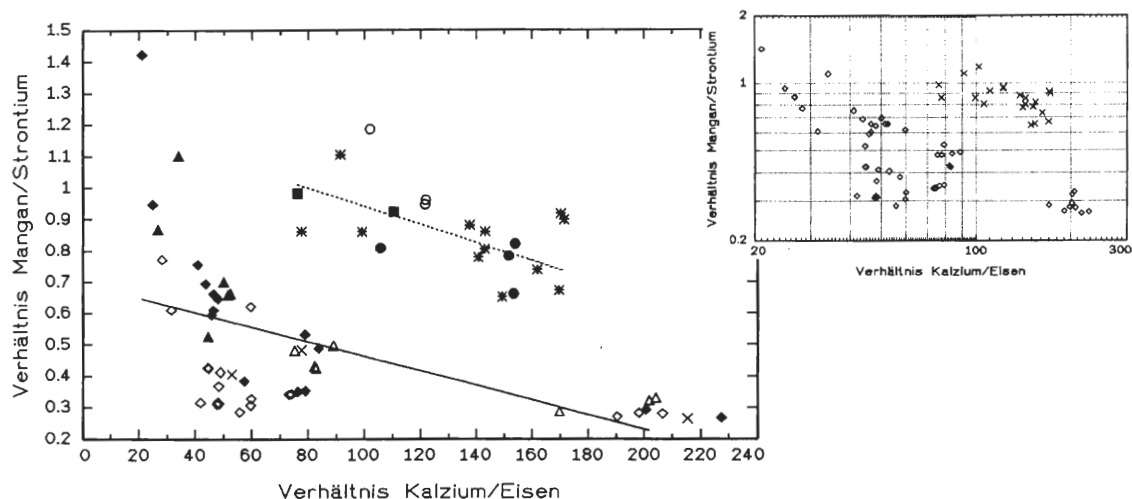


Abb. 50: Diagramme der Korrelation zwischen dem Verhältnis Mangan-Gehalt/Strontium-Gehalt und dem Verhältnis Kalzium-Gehalt/Eisen-Gehalt. Zeichenerklärung:

Großes Diagramm links: a) Symbole der Mikrofaziestypen (1-4 = Probenkollektiv S, 5-9 = Probenkollektiv K): 1 = ○, 2 = ●, 3 = *, 4 = ■; 5 = △, 6 = ▲, 7 = ◇, 8 = ◆, 9 = x; b) Signaturen der Regressionsgeraden: Probenkollektiv K = —————; Probenkollektiv S = - - - - -.

Kleines Diagramm rechts: Desgl. logarithmische Achsen. Probenkollektiv K = ◇; Probenkollektiv S = x.

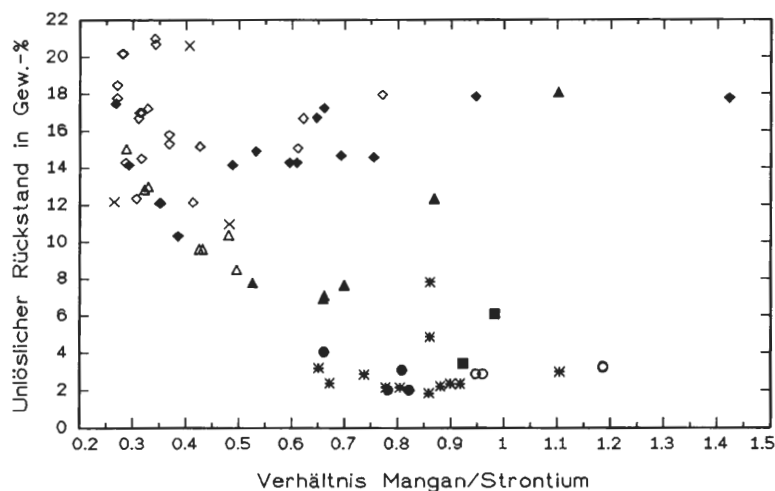


Abb. 51: Diagramm der Korrelation zwischen dem Verhältnis Mangan-Gehalt/Strontium-Gehalt und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%). Symbole der Mikrofaziestypen (1-4 = Probenkollektiv S, 5-9 = Probenkollektiv K): 1 = ○, 2 = ●, 3 = *, 4 = ■; 5 = △, 6 = ▲, 7 = ◇, 8 = ◆, 9 = x.

schen Daten ziemlich deutlich voneinander trennen konnte. Die Clusteranalysen meiner Proben wurden mit dem Programm ST-Statistik durchgeführt. Da es mehrere verschiedene Algorithmen zur Erzeugung der Distanzmatrix und zur Durchführung der Clusteranalyse gibt (siehe z. B. DEICHSEL & TRAMPISCH 1985), es sich aber nicht leicht vorhersagen läßt, welcher die geeignetsten Ergebnisse erbringt, wurden zahlreiche Varianten erprobt. In allen Fällen erbrachte die Berechnung nach WARD's Verfahren die besten Ergebnisse. Nicht einmal der beste Fall - die Clusteranalyse nach WARD's Verfahren mit einer Distanzmatrix erstellt aus standardisierten Variablen mit der quadrierten Euklidischen Distanz aus den Elementgehalten und den Quotienten Kalzium/Eisen und Mangan/Strontium - erlaubte eine ganz saubere Trennung beider Probenkollekti-

ve. Eine klare Trennung der Mikrofaziestypen ließ sich nirgends erkennen.

Rückblickend läßt sich folgendes Resümee der geochemischen Untersuchungen ziehen: Der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand besitzt für die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen eine $\pm$ wichtige Bedeutung und sollte deshalb bei derartigen Untersuchungen immer erfaßt werden. Die am ICP-AES gemessenen Element-Gehalte (Ca, Mg, Fe, Na, K, Sr, Ba, Al, Mn) und die daraus ableitbaren Quotienten spielen demgegenüber keine Rolle für die Verwitterungsbeständigkeit der Kalksteine. Die Gehalte an Kalzium, Aluminium und Kalium zeigen zwar Korrelationen mit der Verwitterungsbeständigkeit; sie lassen sich aber direkt aus ihrer Korrelation mit dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ableiten. Der Beitrag der am ICP-AES gemessenen Element-Gehalte und der Quotienten zur Identifizierung und Charakterisierung der verschiedenen Kalkstein-Typen ist nur gering. Zwar lassen sich die beiden Probenkollektive K und S $\pm$ deutlich gegeneinander abgrenzen, aber das gelingt schon bei einer makroskopischen Gesteinsansprache, da beide verschiedenen Unterabteilungen und marinen Environments angehören. Zwar lassen sich unter den mittels Dünnschliff-Untersuchungen unterschiedenen Mikrofaziestypen einzelne auch geochemisch gegeneinander abgrenzen, aber das ist nicht durchgängig möglich. Wenn man den Arbeitsaufwand der Analyse des salzsäurelöslichen Anteils mit der geringen Menge an Ergebnissen für die in dieser Arbeit thematisierten Fragestellungen vergleicht, muß man in bezug auf zukünftige Untersuchungen zu der Erkenntnis kommen, daß die zu erwartenden Ergebnisse den Aufwand nicht rechtfertigen! Aus diesem Grund wurde bei der Untersuchung der Probenkollektive P und E auf eine Analyse des salzsäurelöslichen Anteils verzichtet.

5. Interpretation und Anwendung der Untersuchungsergebnisse

Im letzten Kapitel wurden die durch die Untersuchung der Probenkollektive K, S, P und E gewonnenen Daten vorgestellt. Danach wurde versucht, Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern herauszuarbeiten und festzustellen, ob die beobachteten Korrelationen für die Fragestellung dieser Arbeit relevant sind. Dabei konzentrierte sich das Augenmerk logischerweise auf zwei Parameter: den korrigierten Gefüge-Index (als Maß für die beobachtete Verwitterungsbeständigkeit) und den Mikrofaziestyp (zur Charakterisierung der Gesteinsvarietäten). Es zeigte sich, daß die Porositätskennwerte (insbesondere die freiwillige Wasseraufnahme und die Schurecht-Ratio) und der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand die Verwitterungsbeständigkeit dieser Kalksteine beeinflussen. Zumindest in einzelnen Probenkollektiven spielen anscheinend auch der Grad der Entwicklung von Stylolithen, die Entwicklung der Schichtung oder das Auftreten sparitischer Zemente eine gewisse Rolle.

In diesem Kapitel sollen darauf aufbauend folgende Fragen diskutiert werden:

- Wie muß die relative Bedeutung der wichtigen und leicht quantifizierbaren Parameter Porositätskennwerte und Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand für die Verwitterungsbeständigkeit zueinander gewichtet werden?
- Wie groß ist der Einfluß von Parametern wie der Grad der Entwicklung von Stylolithen, die Entwicklung der Schichtung oder das Auftreten sparitischer Zemente auf die Verwitterungsbeständigkeit? Lassen sich hinreichend genaue Aussagen über die Verwitterungsbeständigkeit eines Kalksteins anhand allein der Porositätskennwerte und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand machen?
- Welche Vorgehensweisen bieten sich an, um in Kalksteinen besonders verwitterungsbeständige Varietäten zu finden?

5.1. Interpretation der Untersuchungsergebnisse

In diesem Unterkapitel, in dem der Schritt von speziellen Aussagen über einzelne Probenkollektive zu allgemeinen Aussagen über Kalksteine getan werden soll, spielt der Mikrofaziestyp naturgemäß nur eine untergeordnete Rolle, da er ein qualitatives und nicht (oder nur schwer) quantifizierbares Kriterium ist, das zwischen verschiedenen Kalksteinen nicht leicht übertragbar ist. Erst wenn sich eine bestimmte Varietät eines Kalksteins als besonders verwitterungsbeständig (oder -unbeständig) erwiesen hat, ist der Mikrofaziestyp zur Identifizierung und Wiedererkennung dieser Varietät wichtig.

Da im weiteren das Zusammenspiel mehrerer Parameter betrachtet werden soll, ist es nicht sehr praktisch, mit dem korrigierten Gefüge-Index wie bisher zu verfahren, denn zum einen lassen sich in zweidimen-

sionalen (bzw. dreidimensionalen) Korrelationsdiagrammen nur zwei (bzw. drei) Parameter analog darstellen und zum anderen hängt die absolute Größe des korrigierten Gefüge-Indexes vom Probenkollektiv (bzw. von der Mauerstein-Generation) ab - man vergleiche z. B. die Generation 1 und die Generation 2 des Probenkollektivs P miteinander. Deshalb werden in jedem Probenkollektiv (bzw. Mauerstein-Generation) die drei Klassen überdurchschnittlich, durchschnittlich und unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Mauersteine unterschieden. Eine Zusammenstellung gibt Tabelle 2:

Tabelle 2: Klassen der Verwitterungsbeständigkeit der untersuchten Mauersteine, definiert durch die Größe des korrigierten Gefüge-Indexes.

Probenkollektiv (und Generation)	Verwitterungsbeständigkeit		
	überdurchschnittlich	durchschnittlich	unterdurchschnittlich
K	< 4	4 – 6,5	> 6,5
S	< 5	5 – 9	> 9
P, Generation 1	< 4,6	4,6 – 9	> 9
P, Generation 2	< 4	4 – 4,9	> 4,9
E	< 5	5 – 8	> 8

5.1.1. Alleinige Betrachtung der Porositätskennwerte

Vielversprechend ist eine Betrachtung der Porositätskennwerte, insbesondere der effektiven Porosität, der freiwilligen Wasseraufnahme und der Schurecht-Ratio, da diese Parameter sowohl in den untersuchten Probenkollektiven gut mit dem korrigierten Gefüge-Index korrelieren als auch in anderen Untersuchungen als wichtig für die Verwitterungsbeständigkeit von Baustoffen erkannt worden sind (siehe Kap. 2.6. und 4.3.). Da in der Literatur besonders häufig die Bedeutung und Anwendbarkeit von Sättigungswert (bzw. Schurecht-Ratio) und effektiver Porosität diskutiert werden, soll in diesem Kapitel zuerst die Korrelation zwischen Schurecht-Ratio und effektiver Porosität untersucht werden. In den Abbildungen 52, 53 und 55 werden für jedes Probenkollektiv getrennt die in die Verwitterungsbeständigkeits-Klassen der Tabelle 2 differenzierten Mauersteine in das Korrelationsdiagramm Schurecht-Ratio gegen effektive Porosität eingetragen. Die Diagramme für die Probenkollektive K, S und E zeigen vergleichbare Bilder: Trotz der Streuung der Meßwerte ist erkennbar, daß sich die überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine im linken (und unteren) Teil des Diagramms konzentrieren, während die unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine bevorzugt den rechten (und oberen) Teil des Diagramms besetzen. Daraus läßt sich schließen, daß bei gleichzeitiger Zunahme von Schurecht-Ratio und effektiver Porosität die Verwitterungsbeständigkeit des Kalksteins abnimmt, während bei gleichzeitiger Abnahme beider Parameter die Verwitterungsbeständigkeit zunimmt. Im Probenkollektiv P (Abb. 53) ist diese Korrelation nur sehr schwach und nicht so leicht zu erkennen, denn

- bei einer derart geringen effektiven Porosität ist die Meßgenauigkeit methodisch bedingt gering [siehe Kap. 4.3. und NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 15)].
- bei einem Probenkollektiv mit einer derart geringen Porosität ist zu erwarten, daß die Bedeutung der Porositätskennwerte für die Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit gegenüber der Bedeutung anderer Faktoren abnimmt.

Daß es Zusammenhänge zwischen der Verwitterungsbeständigkeit eines Kalksteins und seiner Lage im Korrelationsdiagramm Schurecht-Ratio gegen effektive Porosität gibt, wurde schon in einigen früheren Arbeiten erkannt:

- 1) HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345) trugen in das Diagramm „Saturation coefficient“ (entspricht Schurecht-Ratio) gegen „Porosity“ (= effektive Porosität) die Meßwerte von Kalkstein-Probenwürfeln ein, die einem mehrjährigen Frostbeständigkeits-Test im Freiland unterworfen worden waren, und konnten eine Gerade ziehen, die ziemlich sauber beständige von unbeständigen Kalksteinen schied. Die Gerade von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345, Abb. 2) läuft von einer Schurecht-Ratio von 0,5 bei 40 Vol.-% effektiver Porosität zu einer Schurecht-Ratio von 0,9 bei 0 Vol.-% effektiver Porosität. Die beständigen Kalksteine liegen unterhalb der Geraden.
- 2) Die französischen Norm NF B 10 502 unterscheidet im Diagramm Saturation coefficient / Porosity vier Zonen (LEARY 1981: 77-78; ROSS, HART & BUTLIN 1991: 104-105), die zusammen mit der kapillaren

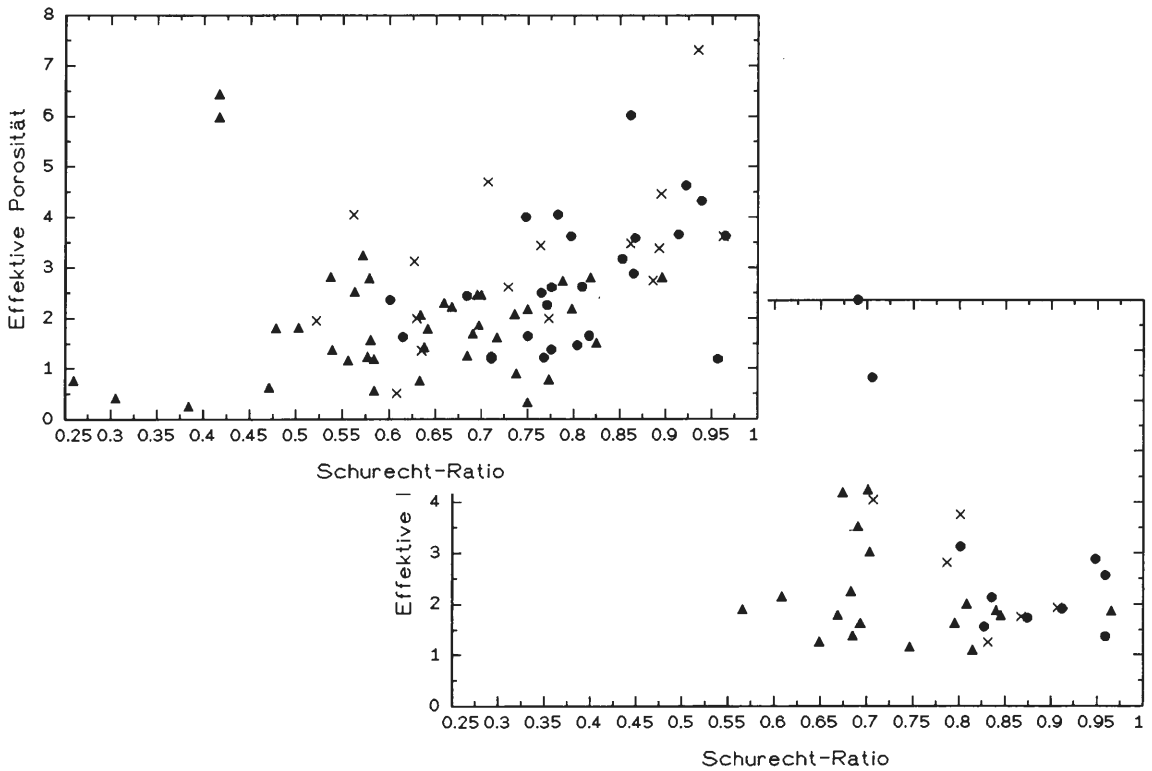


Abb. 52: Diagramme der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der effektiven Porosität (in Vol.-%). Links oben Probenkollektiv K, rechts unten Probenkollektiv S. Zeichenerklärung:
 ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4 (Probenkollektiv K), bzw. < 5 (Probenkollektiv S);
 x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4–6,5 (Probenkollektiv K), bzw. 5–9 (Probenkollektiv S);
 ● = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 6,5 (Probenkollektiv K), bzw. > 9 (Probenkollektiv S).

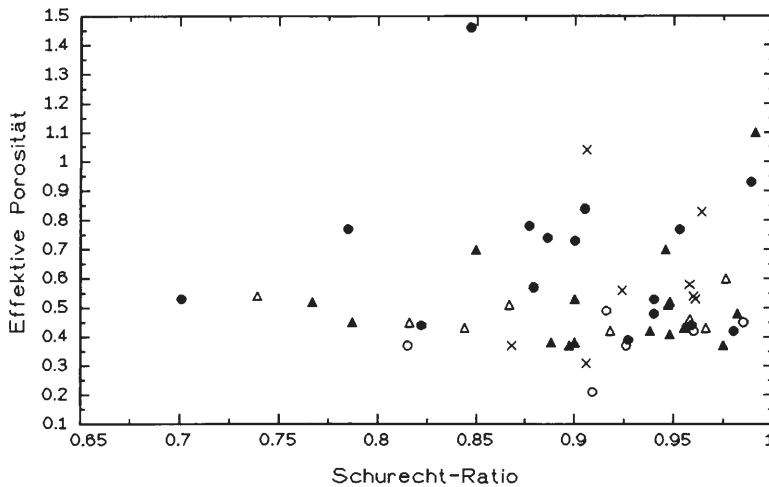


Abb. 53: Diagramm der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der effektiven Porosität (in Vol.-%). Probenkollektiv P. Zeichenerklärung: ▲, x und ● = Generation 1; △ und ○ = Generation 2.
 ▲ / △ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4,6 (Generation 1), bzw. < 4 (Generation 2);
 x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4,6–9 (Generation 1);
 ● / ○ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Generation 1), bzw. > 4,9 (Generation 2).

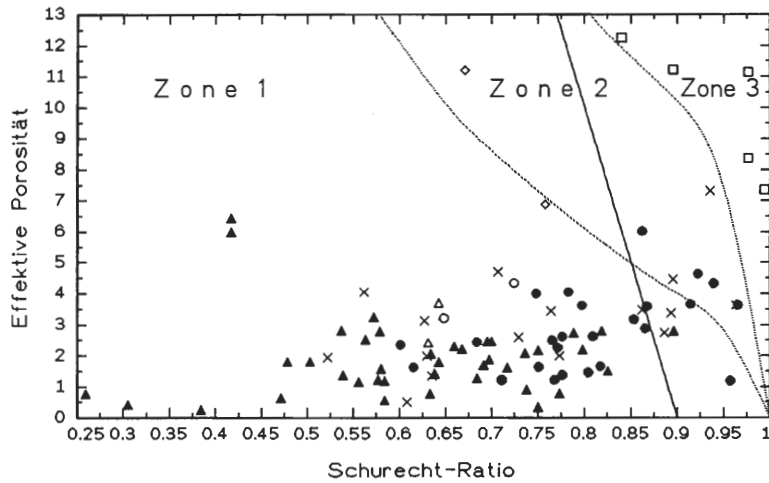


Abb. 54: Diagramm der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der effektiven Porosität (in Vol.-%). Probenkollektiv K. Dieses Diagramm unterscheidet sich vom entsprechenden Diagramm der Abb. 52 (Zeichenerklärung siehe dort) durch die zusätzliche Eintragung der mit □ gekennzeichneten Proben des Mikrofaziestyps 10 (Osnabrücker Wellenkalk; Proben-Nr.: B10, B13, H1) und die Eintragung eines Kalksteins aus Syrien mit folgenden Symbolen: ○ = Probe SY1, ◇ = Probe SY2, △ = Probe SY3. In das Diagramm sind die Gerade von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345) als — und die Grenzen zwischen den von der französischen Norm NF B 10 502 unterschiedenen Zonen als dargestellt.

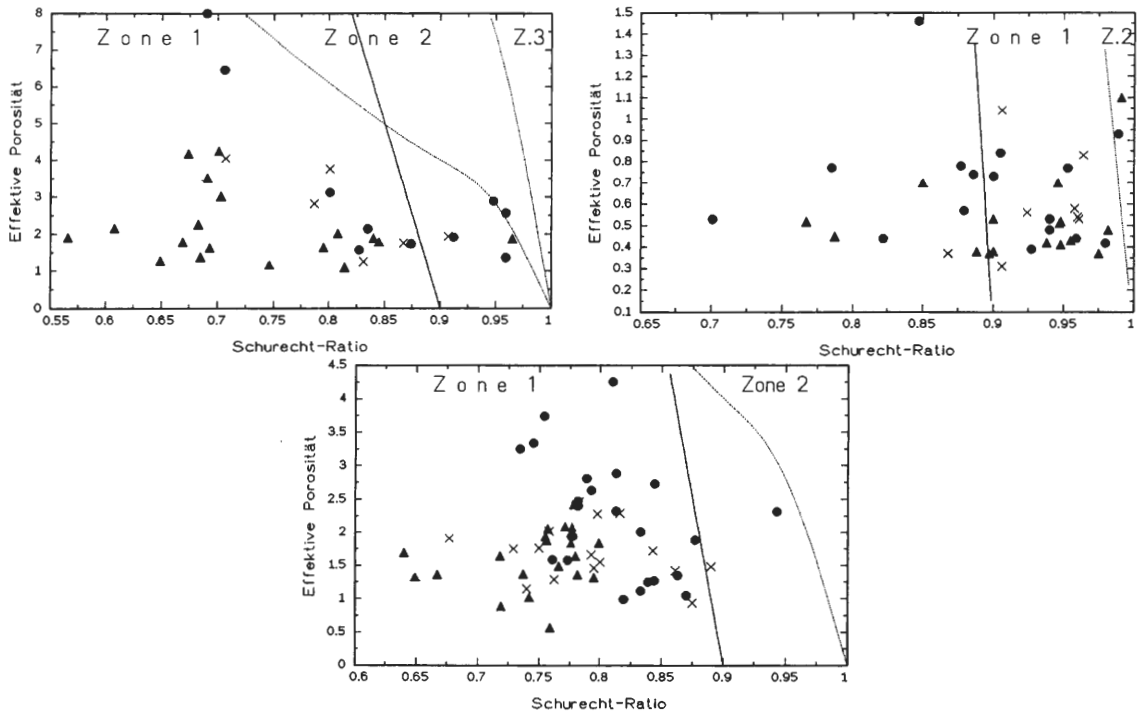


Abb. 55: Diagramme der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der effektiven Porosität (in Vol.-%). Oben links Probenkollektiv S, oben rechts Generation 1 des Probenkollektivs P, unten mitte Probenkollektiv E. Diese Diagramme unterscheiden sich von den entsprechenden Diagrammen der Abb. 52-54 (Zeichenerklärung siehe dort) durch die zusätzliche Eintragung der Geraden von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345) als — und der Grenzen zwischen den von der französischen Norm NF B 10 502 unterschiedenen Zonen als

Wasseraufnahme als Kriterien für die Verwendbarkeit der Kalksteine gelten, wobei die Zone 1 die Kalksteine mit der besten Beständigkeit umfaßt.

In den Abbildungen 54-55 kann man den Verlauf der Geraden von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345, Abb. 2) und die Grenzen der Zonen der französischen Norm NF B 10 502 mit der Verteilung der überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen und der unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine der Probenkollektive K, S, P und E vergleichen. Allgemein läßt sich feststellen, daß diese Grenzen mit ziemlich großer Steigung von hoher effektiver Porosität und niedriger Schurecht-Ratio zu niedriger Porosität und hoher Schurecht-Ratio verlaufen. Damit entsprechen sie den anhand der Probenkollektive gemachten Beobachtungen. Aber diesen Grenzen ist ebenfalls gemeinsam, daß das von ihnen begrenzte Feld, das beständige Mauersteine enthalten soll, in den Probenkollektiven immer noch viele unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Mauersteine zeigt. Diese Grenzen reichen also nicht aus, um in meinem Material die überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine herauszufinden.

Nach der Berücksichtigung der Ergebnisse des Kap. 4.3. muß es als erfolgversprechender gelten, statt der effektiven Porosität die freiwillige Wasseraufnahme mit der Schurecht-Ratio zu kombinieren, da die freiwillige Wasseraufnahme besser mit dem korrigierten Gefüge-Index korreliert als die effektive Porosität. Außerdem beobachteten ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977), daß die Beständigkeit gebrannter Ziegel am besten durch eine Kombination von freiwilliger Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio gewährleistet wird, so daß sich ein Korrelationsdiagramm freiwillige Wasseraufnahme gegen Schurecht-Ratio förmlich aufdrängt. Es wird für die Probenkollektive K, S, P und E mit den Abb. 56-58 geliefert.

Wer die Korrelationsdiagramme freiwillige Wasseraufnahme gegen Schurecht-Ratio der Probenkollektive K, S und E (Abb. 56-57) mit den entsprechenden Korrelationsdiagrammen effektive Porosität gegen Schurecht-Ratio vergleicht, stellt folgendes fest:

- Es treten dieselben Verteilungsmuster auf.
- Die Streuung der Meßwerte ist geringer als im Korrelationsdiagramm effektive Porosität gegen Schurecht-Ratio.
- Deshalb ist es leichter möglich eine Linie zu ziehen, die das Feld überdurchschnittlich verwitterungsbeständiger Mauersteine (im Diagramm links unten) vom Feld unterdurchschnittlich verwitterungsbeständiger Mauersteine (im Diagramm rechts oben) trennt.
- Diese Linie hat zwar dieselbe Richtung, aber eine erheblich geringere Steigung als eine vergleichbare Linie im Korrelationsdiagramm effektive Porosität gegen Schurecht-Ratio haben würde.

Für das Probenkollektiv P gilt über das Korrelationsdiagramm freiwillige Wasseraufnahme gegen Schurecht-Ratio (Abb. 58) dasselbe wie beim Korrelationsdiagramm effektive Porosität gegen Schurecht-Ratio, da die Streuung der Meßwerte aus den dort dargelegten Gründen so groß ist, daß sich nur ein schwacher Trend andeutet.

Auf diesen Beobachtungen aufbauend wurden in Abb. 59 - einem Korrelationsdiagramm freiwillige Wasseraufnahme gegen Schurecht-Ratio - die überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine der Probenkollektive K, S, P und E den unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteinen der Probenkollektive K, S, P und E gegenübergestellt (Verwitterungsbeständigkeits-Klassen siehe Tabelle 2). Die Verteilung der überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen (bzw. der unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen) Mauersteine erlaubte das Eintragen einer Linie, die von links oben nach rechts unten verlaufend die beiden Gruppen ziemlich sauber voneinander trennt. Bei beiden Parametern (freiwillige Wasseraufnahme, Schurecht-Ratio) wurden sowohl lineare Skalen als auch logarithmische Skalen erprobt, wobei sich die Darstellung mit ausschließlich linearen Skalen als optimal erwies. Die Auswertung der Daten der Probenkollektive K und S legte zuerst die Annahme der von MAY (1994 b: Abb. 1; c: Abb. 5) publizierten Geraden nahe, die von einem Punkt A mit einer freiwilligen Wasseraufnahme von 10 Vol.-% und einer Schurecht-Ratio von 0,55 zu einem Punkt B mit einer freiwilligen Wasseraufnahme von 0 Vol.-% und einer Schurecht-Ratio von 0,8 führt.

Die Berücksichtigung der später untersuchten Probenkollektive P und E erwies, daß die Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme, die überdurchschnittlich verwitterungsbeständige und unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Mauersteine am besten voneinander trennt, nicht durch eine lineare, sondern durch eine exponentielle Funktion beschrieben wird. Trotzdem ist die Formel der empirisch ermittelten Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme ziemlich einfach:

$$\text{Schurecht-Ratio}_{\text{Grenzlinie}} = \frac{1}{(\text{Freiwillige Wasseraufnahme}_{\text{Probe}} + 1,8)^{0,22}}$$

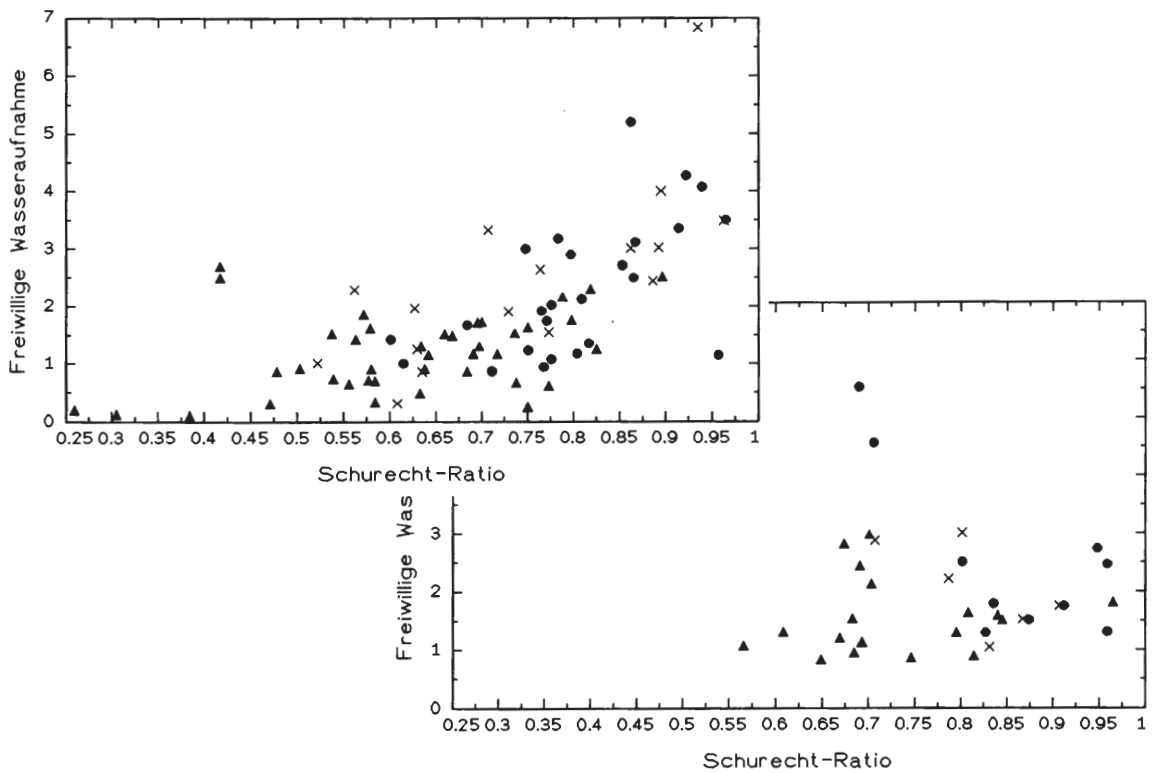


Abb. 56: Diagramme der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%). Links oben Probenkollektiv K, rechts unten Probenkollektiv S. Zeichenerklärung:
 ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4 (Probenkollektiv K), bzw. < 5 (Probenkollektiv S);
 x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4–6,5 (Probenkollektiv K), bzw. 5–9 (Probenkollektiv S);
 ● = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 6,5 (Probenkollektiv K), bzw. > 9 (Probenkollektiv S).

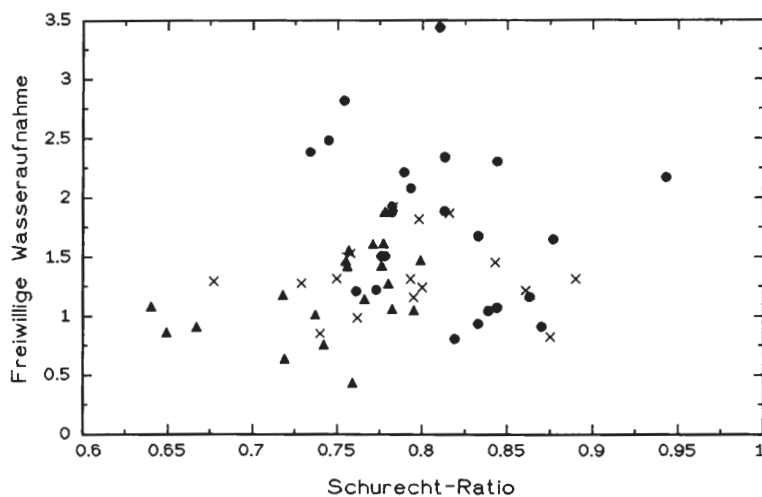


Abb. 57: Diagramm der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%). Probenkollektiv E. Zeichenerklärung: ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 5; x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 5–8; ● = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 8.

Der Verlauf der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme wird in Abb. 59-60 durch die durchgezogene Linie dargestellt. Bei einer freiwilligen Wasseraufnahme von mehr als 10 Vol.-% ist der Verlauf der Grenzlinie nicht mehr experimentell abgesichert, da mir keine Proben aus diesem Meßwert-Bereich (freiwillige Wasseraufnahme > 10, Schurecht-Ratio < 0,7) vorliegen. Die obere Grenze des Geltungsbereiches der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme soll vorläufig bei einer freiwilligen Wasseraufnahme von 20 Vol.-% gezogen werden, da sich durch Einsetzen in diese Formel eine Schurecht-Ratio von 0,5 und notwendigerweise eine effektive Porosität von 40 Vol.-% ergeben würde - damit hätte die effektive Porosität

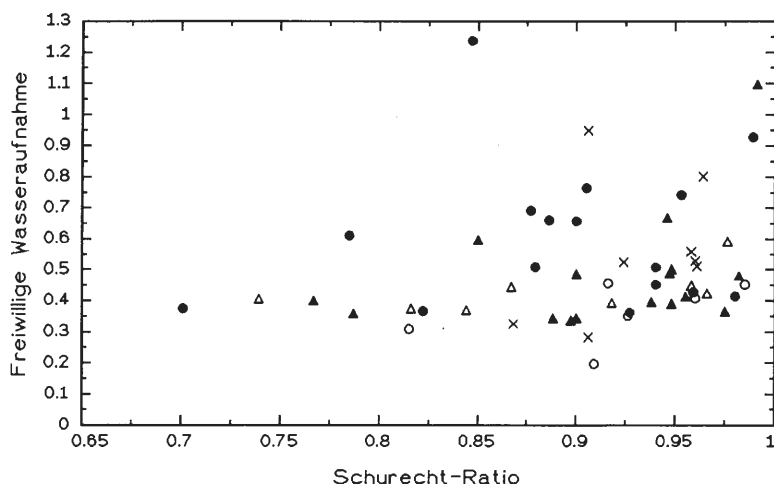


Abb. 58: Diagramm der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%). Probenkollektiv P. Zeichenerklärung: ▲, x und ● = Generation 1; △ und ○ = Generation 2. ▲ / △ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4,6 (Generation 1), bzw. < 4 (Generation 2); x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4,6–9 (Generation 1); ● / ○ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Generation 1); bzw. > 4,9 (Generation 2).

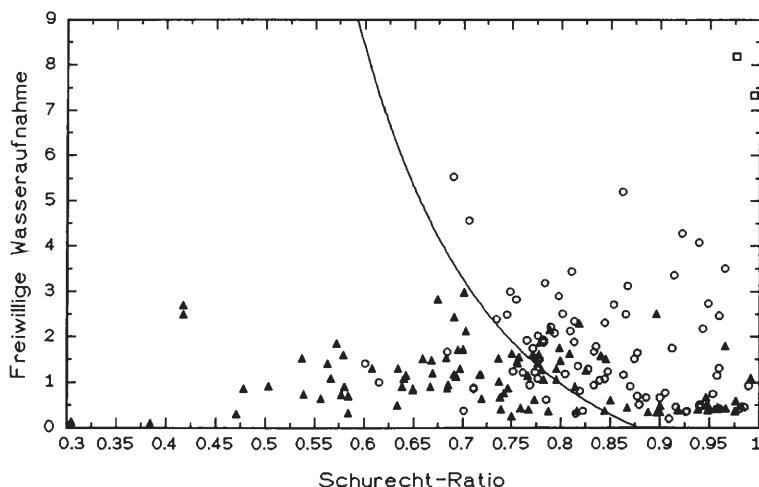


Abb. 59: Diagramm der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%). Aus den Probenkollektiven K, S, P und E werden die überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine (gekennzeichnet durch ▲) den unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteinen (gekennzeichnet durch ○) gegenübergestellt. Die Definition der Verwitterungsbeständigkeits-Klassen folgt Tabelle 2. Die Verteilung von ▲ und ○ führt zum Eintragen der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme, die durch die durchgezogene Linie dargestellt wird. (Erläuterungen und Diskussion im Text). Mit □ sind rechts oben Proben des Mikrofaziestyps 10 markiert.

einen für Kalksteine ungewöhnlich hohen Wert erreicht. Auf der anderen Seite gilt die Aussagekraft der Grenzlinie bei einer freiwilligen Wasseraufnahme von weniger als 1 Vol.-% nur noch eingeschränkt, da bei einer derart geringen Porosität die Meßgenauigkeit methodisch bedingt gering ist und bei Kalksteinen mit einer derart geringen Porosität eine Abnahme der Bedeutung der Porositätskennwerte für die Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zu erwarten ist.

Trotz dieser Einschränkungen kann die Bedeutung der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme nicht hoch genug eingeschätzt werden, denn sie stellt das erste Kriterium dar, das vom Probenkollektiv unabhängig universell anwendbar ist, um Prognosen über die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen zu machen. Durch diese Grenzlinie wird auch eine langwährende Diskussion in der Literatur hinfällig: Seit der Einführung des Sättigungswertes (bzw. der nahe verwandten Schurecht-Ratio) werden von einigen Autoren feste Grenzwerte für den Sättigungswert (bzw. die Schurecht-Ratio) vorgeschlagen, unterhalb derer die Gesteine (bzw. Baustoffe) beständig gegen Frosteinwirkung sein sollen, während andere Autoren diese Grenzen - und mit ihnen die Bedeutung von Sättigungswert oder Schurecht-Ratio - ablehnen (zur Diskussion siehe z. B.: NIESEL & SCHIMMELWITZ 1982: 10-14; ROSS, HART & BUTLIN 1991: 103-104). Die in der Literatur vorgeschlagenen festen Grenzwerte liegen meist zwischen 0,6 und 0,8 und schneiden somit die Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme an verschiedenen Stellen. Daraus folgt, daß jeder der vorgeschlagen Grenzwerte seine Berechtigung bei einer bestimmten freiwilligen Wasseraufnahme (bzw. effektiven Porosität) besitzt und nicht über das gesamte Spektrum hin.

An dieser Stelle ist ein Vergleich mit den in der Literatur vorgeschlagenen Grenzziehungen im Korrelationsdiagramm freiwillige Wasseraufnahme (bzw. effektive Porosität) gegen Schurecht-Ratio (bzw. Sättigungswert) angebracht. Deshalb findet sich in Abb. 60

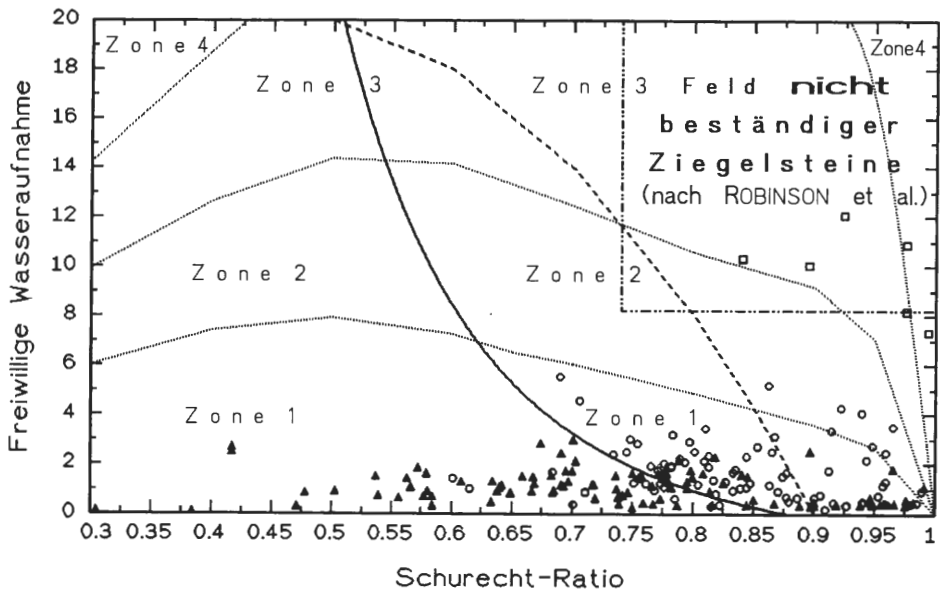


Abb. 60: Diagramm der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%). Aus den Probenkollektiven K, S, P und E werden die überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine (gekennzeichnet durch $\blacktriangle$) den unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteinen (gekennzeichnet durch $\circ$) gegenübergestellt. Die Definition der Verwitterungsbeständigkeits-Klassen folgt Tabelle 2. Mit $\square$ werden die Proben des Mikrofaziestyps 10 (Osnabrücker Wellenkalk; Proben-Nr.: B10, B13, H1) gekennzeichnet. Neben der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme (durchgezogene kräftige Linie) wird dargestellt (Erläuterungen und Diskussion im Text):

- - - - - = Umrechnung der Geraden aus dem Diagramm Saturation coefficient / Porosity von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345)
- = Umrechnung der Grenzen zwischen den von der französischen Norm NF B 10 502 im Diagramm Saturation coefficient / Porosity unterschiedenen Zonen (ROSS, HART & BUTLIN 1991: 105).
- = Spezifikationen zur Unterscheidung beständiger und nicht beständiger Ziegelsteine von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977: 1075). (Rechts oben ist das Feld nicht beständiger Ziegelsteine.)

- die Umrechnung der Geraden aus dem Diagramm Saturation coefficient / Porosity von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345, Abb. 2);
- die Umrechnung der Grenzen zwischen den von der französischen Norm NF B 10 502 im Diagramm Saturation coefficient / Porosity unterschiedenen Zonen (ROSS, HART & BUTLIN 1991: 105, Abb. 2);
- die Spezifikationen zur Unterscheidung beständiger und nicht beständiger Ziegelsteine von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977: 1075).

Die Berücksichtigung der Ziegelstein-Spezifikationen von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977: 1075) ist sinnvoll, da die Zusammenschau der Untersuchungsergebnisse von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977) und MARUSIN (1985) mit den im Kap. 4.3. referierten Ergebnissen ein vergleichbares Verhalten von Kalksteinen und gebrannten Ziegeln erweist. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme wird insofern durch die Spezifikationen von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977) bestätigt, als daß die Grenzlinie durchgängig unterhalb des Feldes nicht beständiger Ziegel verläuft. Die Grenzlinie ist also ein strengeres Kriterium als die Feldgrenzen von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977). Demgegenüber schneidet die Gerade aus dem Diagramm Saturation coefficient / Porosity von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345) die Feldgrenzen von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977). Bei einem Vergleich zwischen der Grenzlinie und der Geraden von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345) stellt man fest, daß beide weitgehend parallel zueinander verlaufen und daß die Grenzlinie das strengere Kriterium darstellt. Letzteres ist nicht sonderlich erstaunlich, da der Geraden von HONEYBORNE & HARRIS (1958: 345) sehr viele verschiedene Kalksteine und ein erheblich geringerer Expositionszeitraum (1-24 Jahre) zugrunde liegen, während der hier vorgeschlagenen Grenzlinie als Baustein erprobte Kalksteine mit einer erheblich längeren Expositionsdauer zugrunde liegen. Deshalb muß die hier vorgeschlagene Grenzlinie, die ja die überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine von unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteinen trennen soll, ein strengeres Kriterium sein als eine Gerade, die nach einer relativ kurzen Expositionsdauer nicht verwitterungsbeständige Mauersteine abtrennen soll. Vor diesem Hintergrund ist der Verlauf der Geraden von HONEYBORNE & HARRIS (1958) eine gute Bestätigung der hier vorgeschlagenen Grenzlinie.

Ganz anders verlaufen die aus dem Diagramm Saturation coefficient / Porosity (ROSS, HART & BUTLIN 1991: 105, Abb. 2) umgerechneten Grenzen zwischen den von der französischen Norm NF B 10 502 unterschiedenen Zonen. Allerdings gibt es zwei Punkte, die diese Grenzen als problematisch erscheinen lassen:

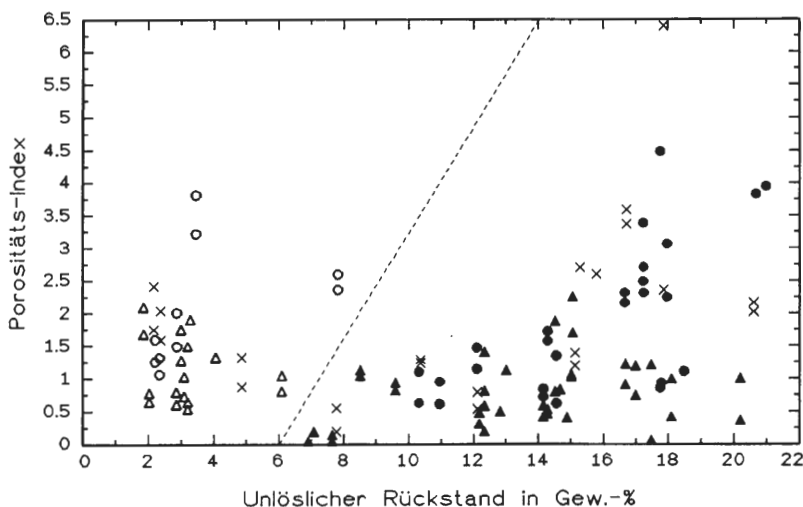


Abb. 61 Diagramm der Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%) und dem Porositäts-Index. Links Probenkollektiv S (mit Δ , x, $\circ$), rechts Probenkollektiv K (mit $\triangle$, x, $\bullet$). Zeichenerklärung:
 $\triangle$ / Δ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4 (Probenkollektiv K), bzw. < 5 (Probenkollektiv S);
 x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4–6,5 (Probenkollektiv K), bzw. 5–9 (Probenkollektiv S);
 $\bullet$ / $\circ$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 6,5 (Probenkollektiv K), bzw. > 9 (Probenkollektiv S).

- 1) Fast alle Proben der Probenkollektive K, S, P und E liegen - unabhängig davon, ob sie über- oder unterdurchschnittlich verwitterungsbeständig sind - in der Zone 1, die die beste Qualität kennzeichnen soll. So ist keine sinnvolle Differenzierung möglich.
- 2) Sämtliche Zonengrenzen sind beulenförmig aufgewölbt und akzeptieren bei einem mittleren Sättigungswert (bzw. Schurecht-Ratio) eine höhere freiwillige Wasseraufnahme als bei einem niedrigen oder einem hohen Sättigungswert (bzw. Schurecht-Ratio). Unter Berücksichtigung des Umstands, daß ganz allgemein eine geringere Schurecht-Ratio (bzw. ein geringerer Sättigungswert) vorteilhaft für die Verwitterungsbeständigkeit ist, ist der Verlauf der Zonengrenzen von mittleren zu niedrigen Sättigungswerten nicht einzusehen.

Nach den bisherigen Beobachtungen läßt sich annehmen, daß die in dieser Arbeit vorgeschlagene Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme für viele - wenn nicht sogar alle - Kalksteine gilt. Da die hauptsächlichste Schädigung der untersuchten Kalksteine auf physikalischen Verwitterungsprozessen beruht (siehe Kap. 7.2.) und das Verhalten gebrannter Ziegel auffällige Parallelen erkennen läßt [siehe ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977) und Kap. 7.2.], ist es gut möglich, daß die Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme auch für gebrannte Ziegel und andere poröse Baustoffe Bedeutung besitzt.

5.1.2. Betrachtung unter Berücksichtigung weiterer Gesteinskennwerte

Nachdem sich gezeigt hat, daß unter den Porositätskennwerten die freiwillige Wasseraufnahme und die Schurecht-Ratio die größte Bedeutung für die Verwitterungsbeständigkeit spielen, muß nun die relative Bedeutung des Gehalts an salzsäureunlöslichem Rückstand (sowie der Stylolithen) im Vergleich dazu geklärt werden. Da nur in einem zweidimensionalen Diagramm eine genaue Ablesung aller Meßwerte möglich ist (vgl. z. B. Abb. 72-78), aber durch die Belegung einer Achse mit dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand nur noch eine Achse für die beiden Parameter freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio zur Verfügung steht, müssen diese beiden Parameter kombiniert werden. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung des im Kap. 4.3. eingeführten Porositäts-Indexes (*Porositäts-Index = Schurecht-Ratio x freiwillige Wasseraufnahme*), die zweite Möglichkeit besteht in der Nutzung der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme zur Berechnung der (hiermit neu aufgestellten) Sättigungsdifferenz nach folgender Formel:

$$\text{Sättigungsdifferenz} = \text{Schurecht-Ratio}_{\text{Probe}} - \text{Schurecht-Ratio}_{\text{Grenzlinie}}$$

Theoretisch kann die Sättigungsdifferenz Werte zwischen -0,88 und +0,58 annehmen, aber im Normalfall werden sich die Werte zwischen -0,5 und +0,4 bewegen. Wenn die Sättigungsdifferenz kleiner als Null ist, bedeutet das, daß die Schurecht-Ratio der Probe kleiner ist als die aus der freiwilligen Wasseraufnahme der Probe errechnete Schurecht-Ratio der Grenzlinie, und somit, daß die Probe im Feld der überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine liegt. Ist die Sättigungsdifferenz größer als Null, liegt die Probe im Feld der unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine.

In den Abb. 61-63 werden die nach den Verwitterungsbeständigkeits-Klassen der Tabelle 2 differenzierten Mauersteine der Probenkollektiv K, S, P und E in das Korrelationsdiagramm Porositäts-Index gegen Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand eingetragen. Die Verwitterungsbeständigkeit der Mauersteine der Probenkollektive K, S und E zeigt zwar eine klare Abhängigkeit vom Porositäts-Index - mit zunehmendem Porositäts-Index nimmt die Häufigkeit der unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine bis zur Dominanz zu -, aber es läßt sich keine Abhängigkeit vom Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand erkennen. Etwas weniger deutlich, aber dennoch gut erkennbar zeigt sich dies auch im Probenkollektiv P. Vergleichbar ist das Bild der Verteilung der Mauersteine der Probenkollektive K, S und E im Korrelationsdiagramm Sättigungsdifferenz gegen Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (Abb. 64-65): Mit zunehmender Sättigungsdifferenz nimmt die Häufigkeit der unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine bis zur Dominanz zu, aber es ist nicht möglich, eine klare Abhängigkeit vom Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand zu erkennen. Sowohl die Verwendung des Porositäts-Indexes als auch die der Sättigungsdifferenz zeigen eindeutig, daß der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand eine erheblich geringere Bedeutung für die Verwitterungsbeständigkeit besitzt als die Porositätsparameter freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio. Obwohl im Kap. 4.6.1. zweifelsfrei gezeigt werden konnte, daß der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen beeinflusst, ist dieser Einfluß so gering, daß er bei der hier verwandten, groben Einteilung in Verwitterungsbeständigkeits-Klassen nicht mehr reproduzierbar ist.

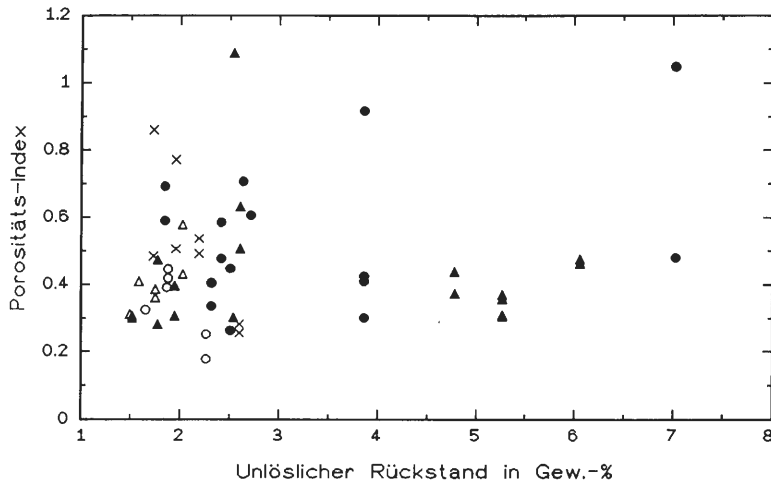


Abb. 62: Diagramm der Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und dem Porositäts-Index. Probenkollektiv P. Zeichenerklärung: ▲, x, ● = Generation 1; △, ○ = Generation 2. ▲ / △ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4,6 (Generation 1), bzw. < 4 (Generation 2); x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4,6–9 (Generation 1); ● / ○ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Generation 1), bzw. > 4,9 (Generation 2).

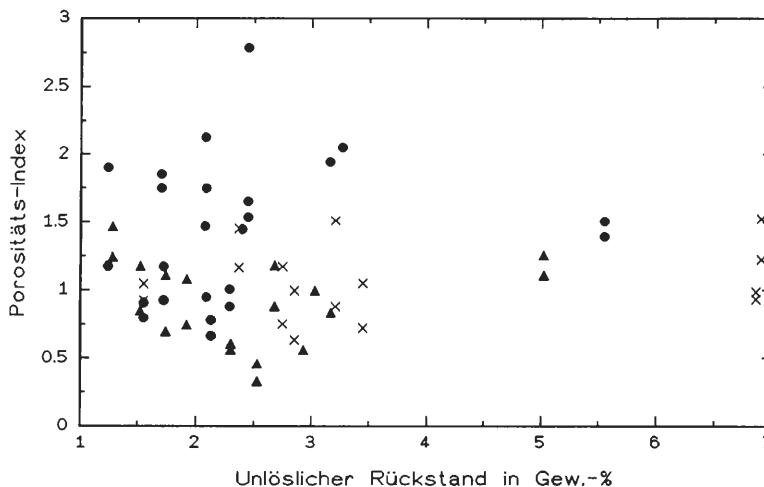


Abb. 63: Diagramm der Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und dem Porositäts-Index. Probenkollektiv E. Zeichenerklärung: ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 5; x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 5–8; ● = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 8.

Die Sättigungsdifferenz bietet sich auch für die Feststellung der relativen Bedeutung des Grades der Entwicklung von Stylolithen für die Verwitterungsbeständigkeit an. Durch Eintragung der nach den Verwitterungsbeständigkeits-Klassen der Tabelle 2 differenzierten Mauersteine des Probenkollektivs K in das Korrelationsdiagramm Sättigungsdifferenz gegen Grad der Entwicklung von Stylolithen ergibt sich Abb. 66. Hier sind zwar bei einer stärkeren Entwicklung der Stylolithen die Mauersteine tendenziell zu positiveren Werten der Sättigungsdifferenz hin verschoben, aber die Verteilung der Verwitterungsbeständigkeits-Klassen ist nur von der Sättigungsdifferenz und nicht von der Entwicklung der Stylolithen abhängig. Das bedeutet, daß sich der Einfluß der Stylolithen auf die Verwitterungsbeständigkeit anscheinend auf eine Beeinflussung der Porositätsparameter (insbesondere der Schurecht-Ratio) beschränkt und nicht darüber hinaus wirksam wird. Die im Kapitel 4.2.3. diskutierte Bedeutung von Stylolithen als primären Schwachstellen, an denen die Verwitterung ansetzt, läßt sich in diesem Diagramm nicht festmachen.

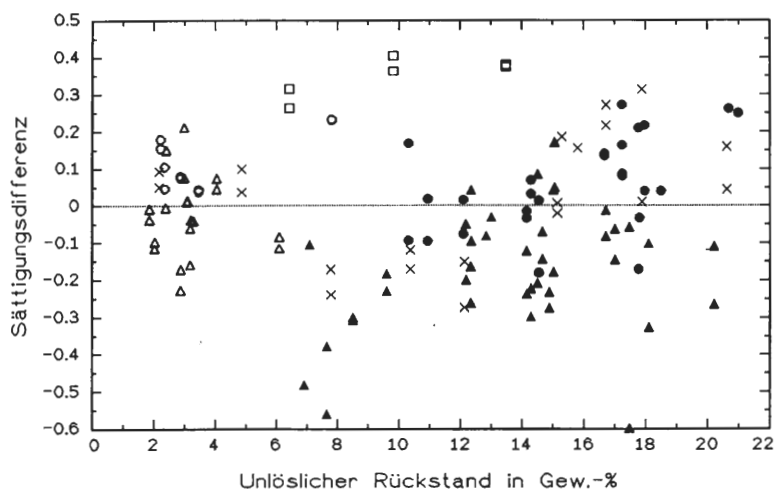


Abb. 64: Diagramm der Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%) und der Sättigungsdifferenz. Links Probenkollektiv S (mit Δ , $\times$, $\circ$), rechts Probenkollektiv K (mit $\triangle$, $\times$, $\bullet$). Zeichenerklärung:

$\triangle$ / Δ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4 (Probenkollektiv K), bzw. < 5 (Probenkollektiv S);
 $\times$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4–6,5 (Probenkollektiv K), bzw. 5–9 (Probenkollektiv S);
 $\bullet$ / $\circ$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: $> 6,5$ (Probenkollektiv K), bzw. > 9 (Probenkollektiv S).
 $\square$ = Proben des Mikrofaziestyps 10 (Osnabrücker Wellenkalk; Proben-Nr.: B10, B13, H1).

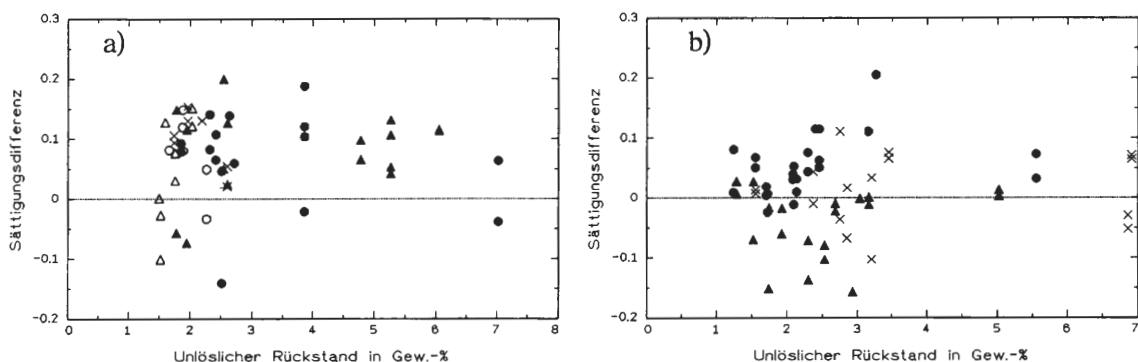


Abb. 65: Diagramme der Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%) und der Sättigungsdifferenz.

a) Probenkollektiv P. Zeichenerklärung: $\triangle$, $\times$, $\bullet$ = Generation 1; Δ , $\circ$ = Generation 2.

$\triangle$ / Δ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: $< 4,6$ (Generation 1), bzw. < 4 (Generation 2);

$\times$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4,6–9 (Generation 1);

$\bullet$ / $\circ$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Generation 1), bzw. $> 4,9$ (Generation 2).

b) Probenkollektiv E. Zeichenerklärung: $\triangle$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 5 ; $\times$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 5–8; $\bullet$ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 8 .

Noch enttäuschender sind die Ergebnisse bei den Probenkollektiven S, P und E, in denen Styrolithen sowieso eine geringere Bedeutung haben (Abb. 67–69): Hier läßt sich kein Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Styrolithen und der Verteilung der Verwitterungsbeständigkeits-Klassen feststellen. Man kann folgendes Resümee ziehen: Der Grad der Entwicklung von Styrolithen spielt nur eine untergeordnete Rolle für die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen, und wenn, dann (hauptsächlich) durch eine Beeinflussung der Porositätskennwerte Schurecht-Ratio und freiwillige Wasseraufnahme.

Wenn man Mikrofaziestyp und Sättigungsdifferenz miteinander korreliert (Abb. 70) lassen sich die schon im Kapitel 4.3. beobachteten Zusammenhänge erneut erkennen – diesmal lassen sich aber alle Probenkollektive in einem Diagramm synoptisch betrachten (was beim Porositäts-Index nicht möglich ist). Die Abbil-

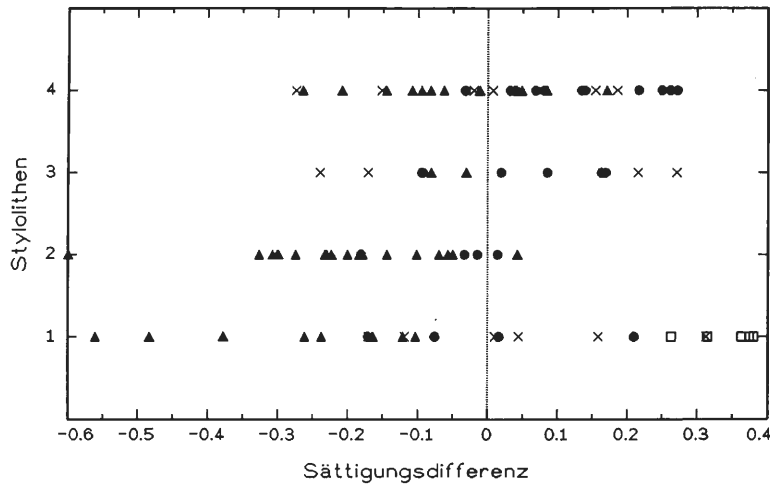


Abb. 66: Diagramm der Korrelation zwischen dem Grad der Entwicklung von Stylolithen und der Sättigungsdifferenz. Probenkollektiv K. Zeichenerklärung: ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4; x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4–6,5; ● = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 6,5. □ = Proben des Mikrofaziestyps 10 (Osnabrücker Wellenkalk; Proben-Nr.: B10, B13, H1).

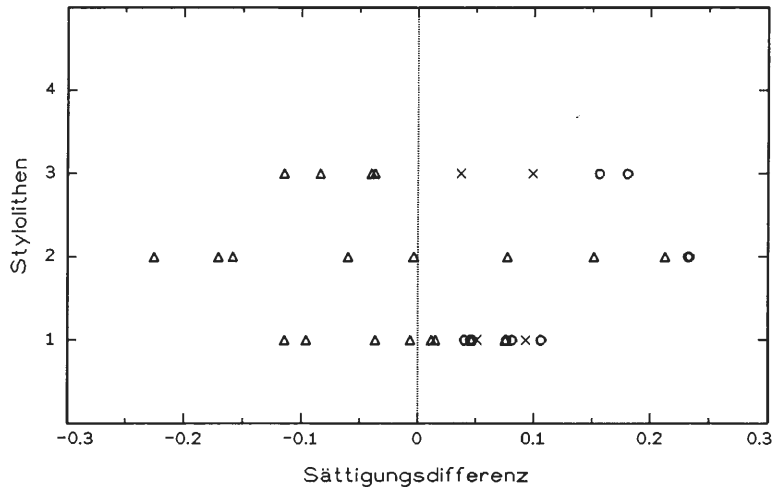


Abb. 67: Diagramm der Korrelation zwischen dem Grad der Entwicklung von Stylolithen und der Sättigungsdifferenz. Probenkollektiv S. Zeichenerklärung: Δ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 5; x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 5–9; ○ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9.

dung 70 zeigt sehr deutlich, daß die Mikrofaziestypen 5 und 6 ihre besondere Verwitterungsbeständigkeit zu einem wichtigen Teil ihren Porositätsparametern verdanken, daß die Porositätseigenschaften des Mikrofaziestyps 10 für die Verwitterungsbeständigkeit sehr ungünstig sind und daß im Probenkollektiv E die Porositätseigenschaften vom Mikrofaziestyp 15 zum Mikrofaziestyp 17 für die Verwitterungsbeständigkeit günstiger werden. Die Korrelation zwischen Mikrofaziestyp und Sättigungsdifferenz gibt aber nicht so deutlich die unterschiedliche Verwitterungsbeständigkeit wieder wie die Korrelation zwischen Mikrofaziestyp und Porositäts-Index (siehe Kap. 4.3., Abb. 29b, 30d, 32b).

An dieser Stelle soll kurz die Verwitterungsbeständigkeit der Gelbkalke (Mikrofaziestyp 10) im Osnabrücker Wellenkalk diskutiert werden, da sie im statistisch ausgewerteten Probenkollektiv K nicht vertreten waren. Ihre Lage im Diagramm der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio und der effektiven Porosität (bzw. der freiwilligen Wasseraufnahme) ist in Abb. 54 (bzw. Abb. 60, 71a) dargestellt. Sie finden sich im Korrelationsdiagramm zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und der Sättigungsdifferenz (bzw. dem Porositäts-Index) in Abb. 64 (bzw. Abb. 71b). Die untersuchten Proben des Mikrofaziestyps 10 zeich-

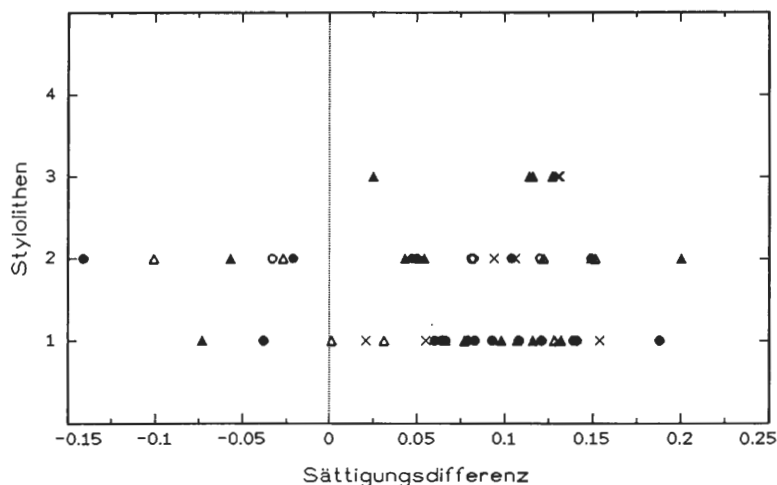


Abb. 68: Diagramm der Korrelation zwischen dem Grad der Entwicklung von Stylolithen und der Sättigungsdifferenz. Probenkollektiv P. Zeichenerklärung: ▲, x, ● = Generation 1; △, ○ = Generation 2.
 ▲ / △ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4,6 (Generation 1), bzw. < 4 (Generation 2);
 x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 4,6–9 (Generation 1);
 ● / ○ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Generation 1), bzw. > 4,9 (Generation 2).

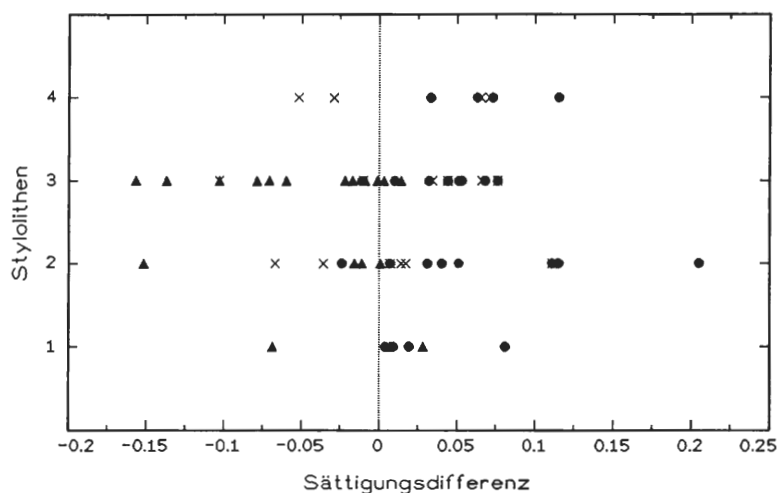


Abb. 69: Diagramm der Korrelation zwischen dem Grad der Entwicklung von Stylolithen und der Sättigungsdifferenz. Probenkollektiv E. Zeichenerklärung: ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 5; x = korrigierter Gefüge-Index der Proben: 5–8; ● = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 8.

nen sich durch eine hohe freiwillige Wasseraufnahme, eine hohe effektive Porosität und eine große Schurecht-Ratio aus. Gleichgültig, welches Diagramm man betrachtet, im Vergleich zu den Mauersteinen der Probenkollektive K und S müssen die Proben des Mikrofaziestyps 10 weniger verwitterungsbeständig sein. Auch ihr relativ geringer Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand kann nicht darüber hinwegtäuschen, daß sie nur unterdurchschnittlich verwitterungsbeständig sind, denn die Priorität der Porositätsparameter ist immer evident. Sie liegen z. B. als einzige bisher in dieser Arbeit untersuchte Kalksteine im Feld nicht beständiger Ziegelsteine von ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977: 1075), wie Abb. 60 zeigt.

Die wichtigsten Gesteinsparameter, die die Verwitterungsbeständigkeit beeinflussen, sind - wie schon herausgearbeitet wurde - die freiwillige Wasseraufnahme, die Schurecht-Ratio und der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand. Für jeden dieser Parameter gilt: Wenn er zunimmt, nimmt die Verwitterungsbeständigkeit ab. Außerdem können diese drei Faktoren einander verstärken. Deshalb wird in den Abbildungen 72

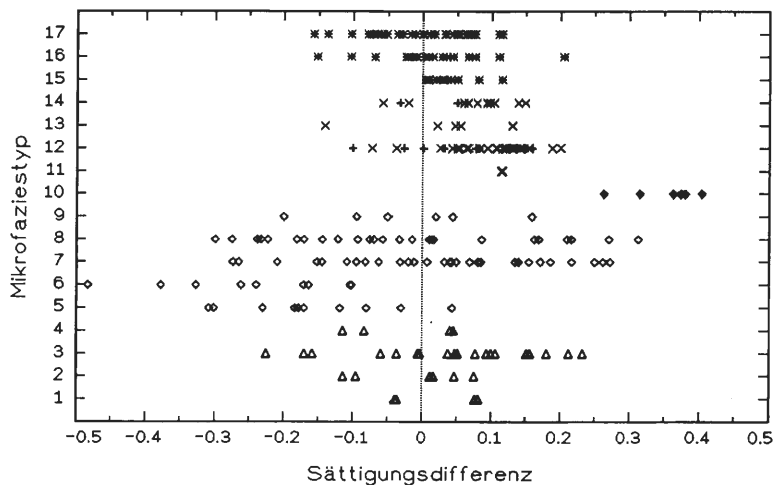


Abb. 70: Diagramm der Korrelation zwischen dem Mikrofaziestyp und der Sättigungsdifferenz.
 Zeichenerklärung: Δ = Probenkollektiv S (Mikrofaziestyp 1–4); $\diamond$ = Probenkollektiv K (Mikrofaziestyp 5–9); $\blacklozenge$ = Proben des Mikrofaziestyps 10 (Osnabrücker Wellenkalk; Proben-Nr.: B10, B13, H1); $\times$ = Probenkollektiv P (Generation 1) (Mikrofaziestyp 11–14); $+$ = Probenkollektiv P (Generation 2) (Mikrofaziestyp 12 + 14); $*$ = Probenkollektiv E (Mikrofaziestyp 15–17).

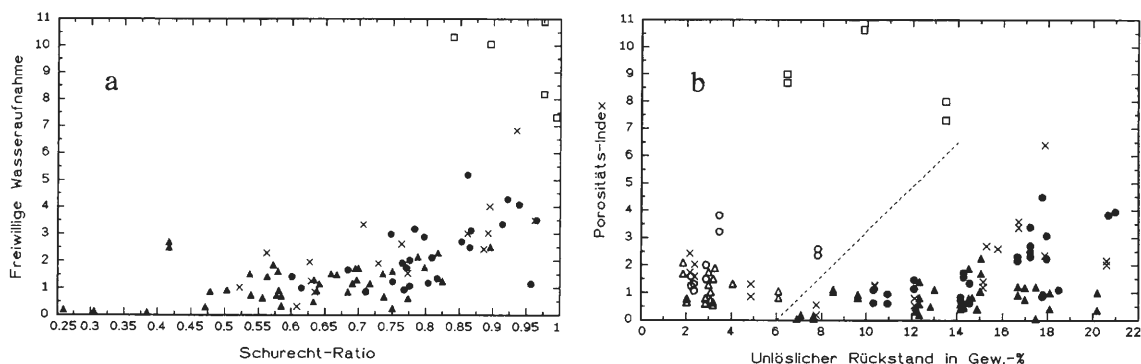


Abb. 71: Diagramme der Korrelation zwischen **a)** der Schurecht-Ratio und der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%) sowie **b)** dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%) und dem Porositäts-Index. Probenkollektiv K. Diese beiden Diagramme unterscheiden sich von den entsprechenden Diagrammen der Abb. 56, 61 (Zeichenerklärung siehe dort) durch die zusätzliche Eintragung der mit $\square$ gekennzeichneten Proben des Mikrofaziestyps 10 (Osnabrücker Wellenkalk; Proben-Nr.: B10, B13, H1).

und 74 die Abhängigkeit zwischen diesen drei Gesteinsparametern und der Verwitterungsbeständigkeit des Mauersteins in einem dreidimensionalen Diagramm dargestellt. Die Achsen des Diagramms sind so angeordnet, daß die Mauersteine, die nach der Größe der drei Gesteinsparameter am verwitterungsbeständigsten sein sollten, in der linken unteren vorderen Ecke des Blockbildes liegen, während die nach der Größe der Gesteinsparameter am wenigsten verwitterungsbeständigen Mauersteine in der rechten oberen hinteren Ecke liegen. Wenn man in dieses Blockbild die überdurchschnittlich verwitterungsbeständigen und die unterdurchschnittlich verwitterungsbeständigen Mauersteine (gemäß Tabelle 2) des Probenkollektivs K einträgt, stellt man folgendes fest: Zum einen läßt sich deutlich die prognostizierte Tendenz erkennen (verwitterungsbeständigere Steine nach links unten vorne, weniger verwitterungsbeständige Steine nach rechts oben hinten), aber zum anderen gibt es ein breites Übergangsfeld, in dem über- und unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Mauersteine nebeneinander vorkommen (siehe Abb. 72).

Wenn man in diesem Blockbild die Mauersteine des Probenkollektivs K entsprechend ihrem Mikrofaziestyp kennzeichnet - wie es in Abbildung 73 geschehen ist -, erscheint ein sehr ähnliches Bild: Die Mauerstei-

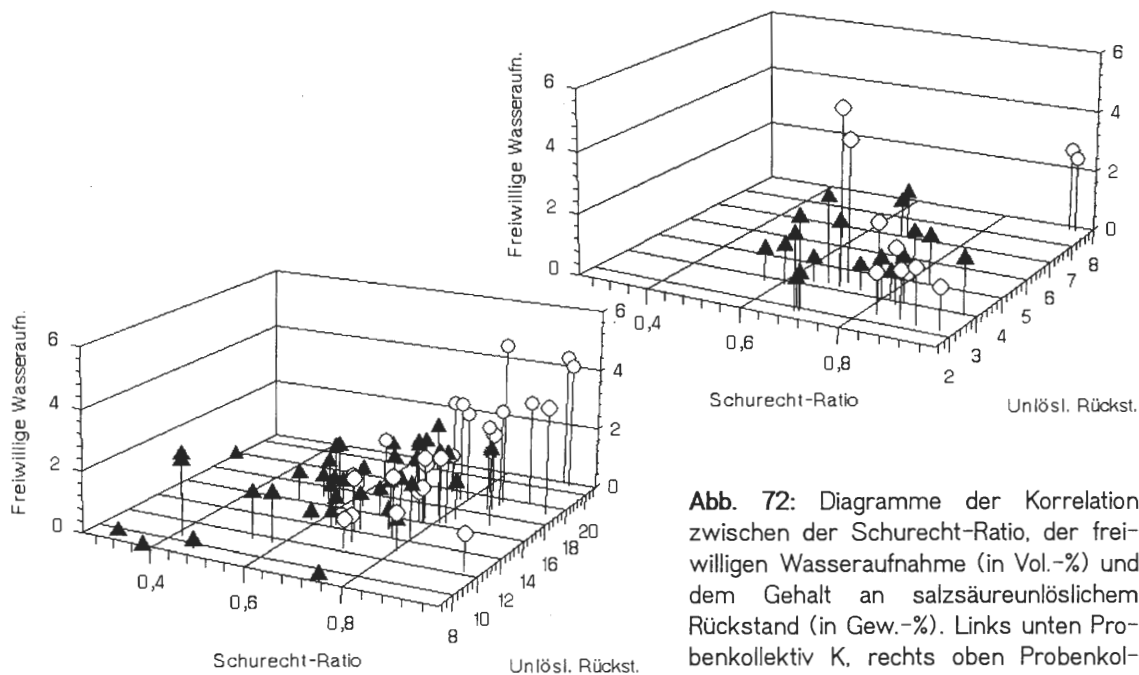


Abb. 72: Diagramme der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio, der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%) und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%). Links unten Probenkollektiv K, rechts oben Probenkollektiv S. Zeichenerklärung:

- ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4 (Probenkollektiv K), bzw. < 5 (Probenkollektiv S);
- = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 6,5 (Probenkollektiv K), bzw. > 9 (Probenkollektiv S).

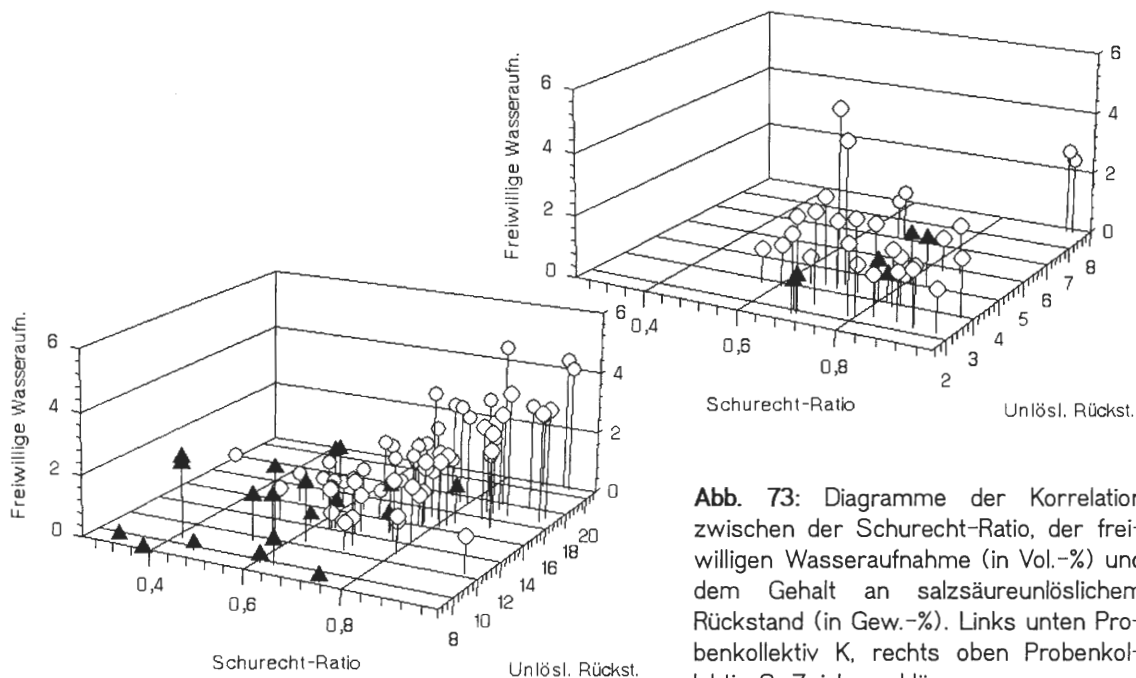


Abb. 73: Diagramme der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio, der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%) und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%). Links unten Probenkollektiv K, rechts oben Probenkollektiv S. Zeichenerklärung:

- ▲ = Mikrofaziestyp 5 + 6 (Probenkollektiv K), bzw. Mikrofaziestyp 2 (Probenkollektiv S);
- = Mikrofaziestyp 7-9 (Probenkollektiv K), bzw. Mikrofaziestyp 1 + 3 + 4 (Probenkollektiv S).

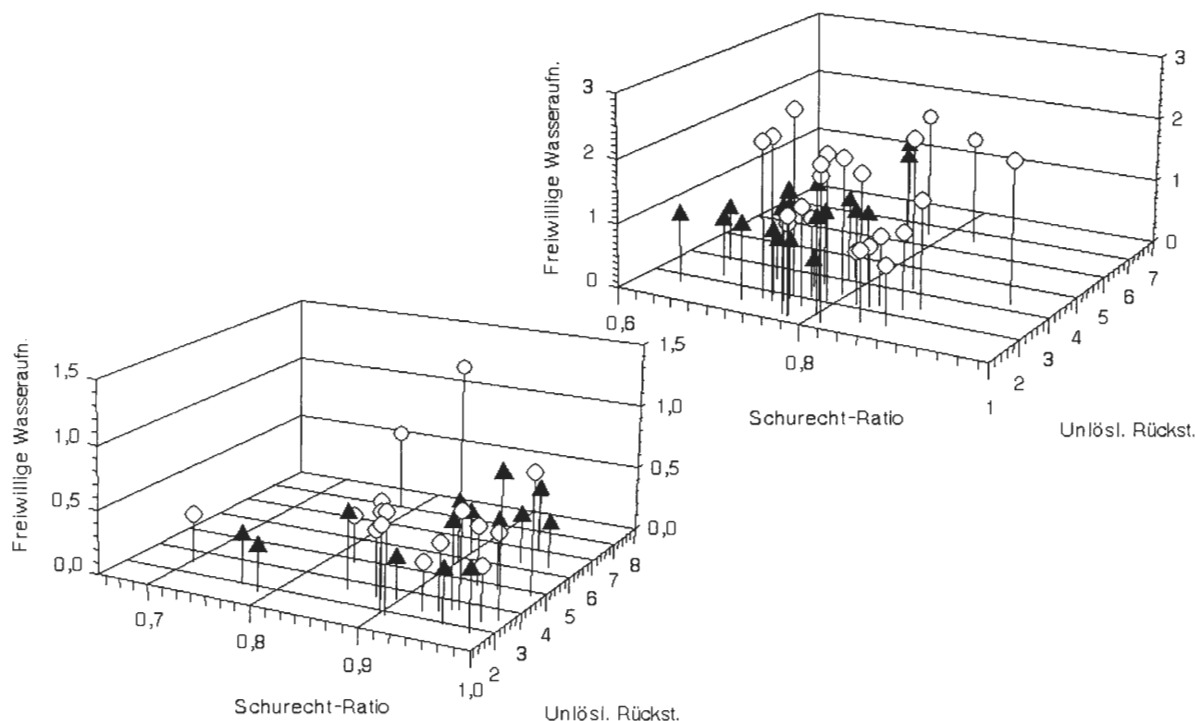


Abb. 74: Diagramme der Korrelation zwischen der Schurecht-Ratio, der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%) und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%). Links unten Probenkollektiv P, Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine), rechts oben Probenkollektiv E.

Zeichenerklärung:

- ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4,6 (Probenkollektiv P), bzw. < 5 (Probenkollektiv E);
- = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Probenkollektiv P), bzw. > 8 (Probenkollektiv E).

ne der verwitterungsbeständigeren Mikrofaziestypen 5 und 6 dominieren den Bereich links unten vorne, während die weniger verwitterungsbeständigen Mikrofaziestypen 7 bis 9 schwerpunktmäßig rechts oben hinten verbreitet sind. Die unterschiedliche Verwitterungsbeständigkeit der verschiedenen Mikrofaziestypen des Probenkollektivs K beruht also zu einem sehr großen Teil auf Unterschieden in der Größe der freiwilligen Wasseraufnahme, der Schurecht-Ratio und dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand.

Wenn man dasselbe mit den Probenkollektiven S und E durchführt, erhält man ein etwas weniger klares Bild: Zwar zeigt sich in Abb. 72 + 74 der negative Einfluß einer großen freiwilligen Wasseraufnahme auf die Verwitterungsbeständigkeit deutlich und der negative Einfluß einer großen Schurecht-Ratio angedeutet, aber der Einfluß des salzsäureunlöslichen Rückstands ist zu gering, um sich in diesen Diagrammen noch niederschlagen zu können. Die Eintragung der Mikrofaziestypen des Probenkollektivs S in Abb. 73 dokumentiert, daß der relativ verwitterungsbeständige Mikrofaziestyp 2 (siehe Kap. 4.2.2.) sich nur durch eine durchgängig geringe freiwillige Wasseraufnahme auszeichnet, während die anderen Parameter durchschnittlich sind. Im Probenkollektiv P, das sich immer wieder in den Korrelationsdiagrammen durch schlechte Korrelationen und starke Streuung ausgezeichnet hat, vermag auch das dreidimensionale Blockbild (Abb. 74) keine weitergehende Klärung zu erreichen - es läßt sich nur die freiwillige Wasseraufnahme als verwitterungsrelevanter Faktor herausfiltern.

Im folgenden Schritt soll erprobt werden, ob die Darstellung in Blockdiagrammen auch die Bedeutung und die wechselseitigen Einflüsse der Porositätsparameter, des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand und des Grades der Entwicklung von Stylolithen erhellen kann. Dazu werden die Porositätsparameter freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio in den Abb. 75-76 durch den Porositätsindex vertreten, während sie in den Abb. 77-78 durch die Sättigungsdifferenz repräsentiert werden. In den Abbildungen mit dem Porositäts-Index (Abb. 75-76) zeigt bei allen vier Probenkollektiven (K, S, P und E) nur der Porositäts-Index eine direkte Beziehung zur Verwitterungsbeständigkeit der Mauersteine. Darüber hinaus deuten sich im Probenkollektiv K folgende Beziehungen an: Mit zunehmendem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand nimmt tendenziell der Grad der Entwicklung von Stylolithen zu, und mit der Zunahme des Grades der Ent-

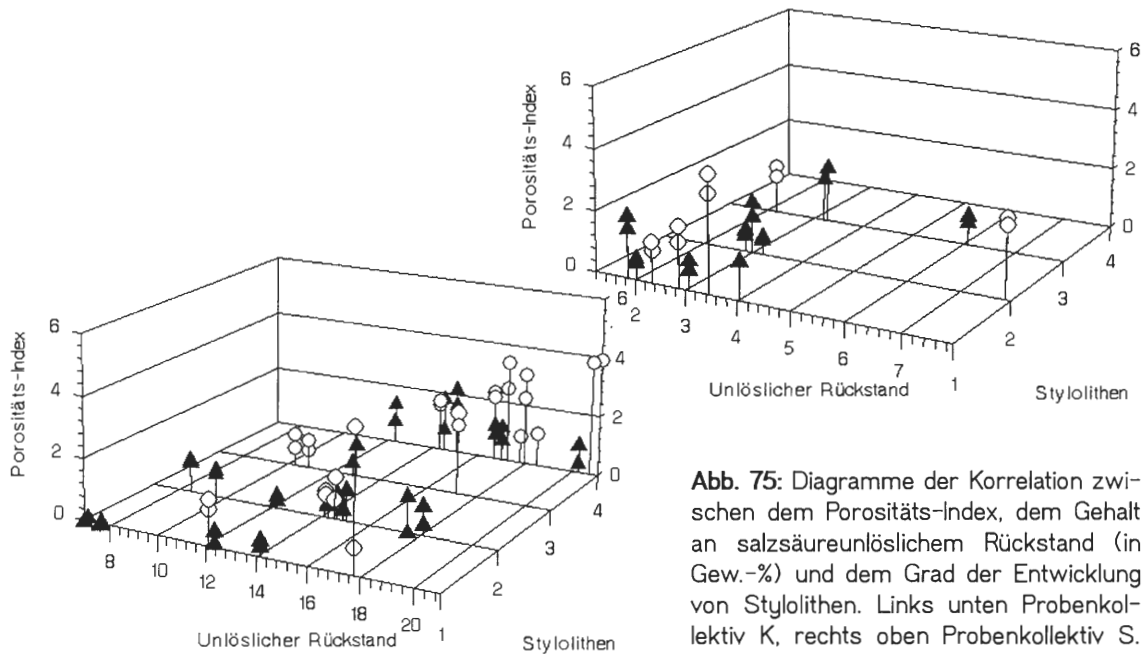


Abb. 75: Diagramme der Korrelation zwischen dem Porositäts-Index, dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%) und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen. Links unten Probenkollektiv K, rechts oben Probenkollektiv S. Zeichenerklärung:

- ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4 (Probenkollektiv K), bzw. < 5 (Probenkollektiv S);
- = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 6,5 (Probenkollektiv K), bzw. > 9 (Probenkollektiv S).

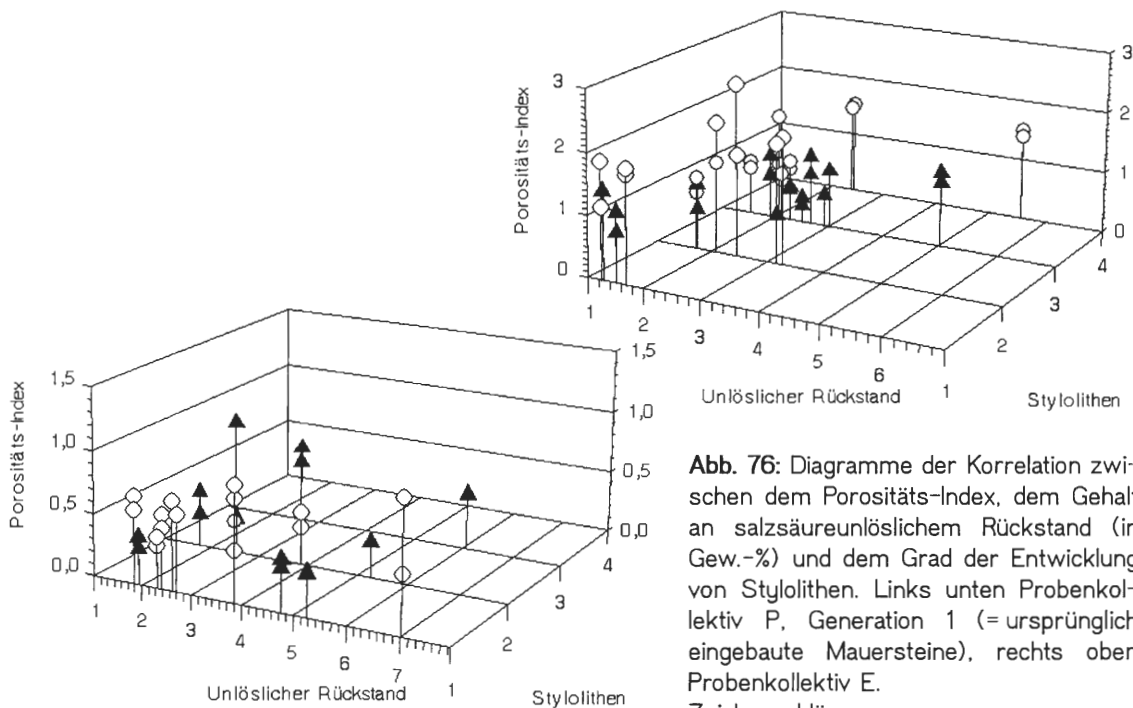


Abb. 76: Diagramme der Korrelation zwischen dem Porositäts-Index, dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%) und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen. Links unten Probenkollektiv P, Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine), rechts oben Probenkollektiv E. Zeichenerklärung:

- ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4,6 (Probenkollektiv P), bzw. < 5 (Probenkollektiv E);
- = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Probenkollektiv P), bzw. > 8 (Probenkollektiv E).

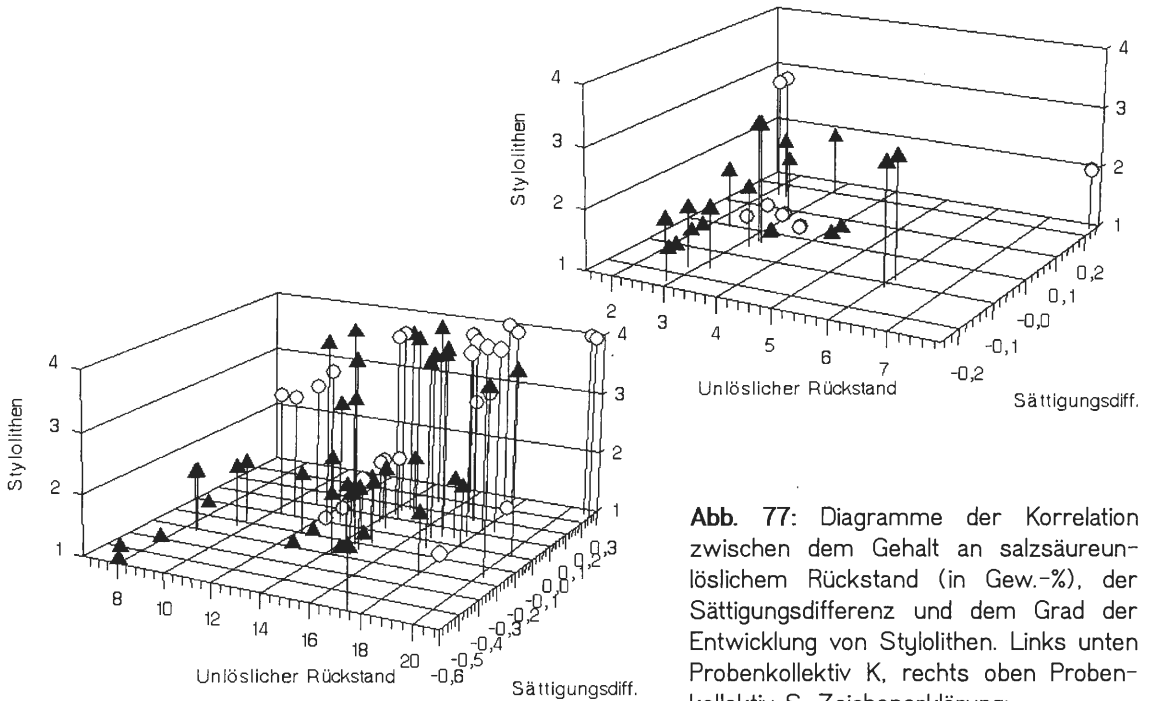


Abb. 77: Diagramme der Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%), der Sättigungsdifferenz und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen. Links unten Probenkollektiv K, rechts oben Probenkollektiv S. Zeichenerklärung:

- ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4 (Probenkollektiv K), bzw. < 5 (Probenkollektiv S);
- = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 6,5 (Probenkollektiv K), bzw. > 9 (Probenkollektiv S).

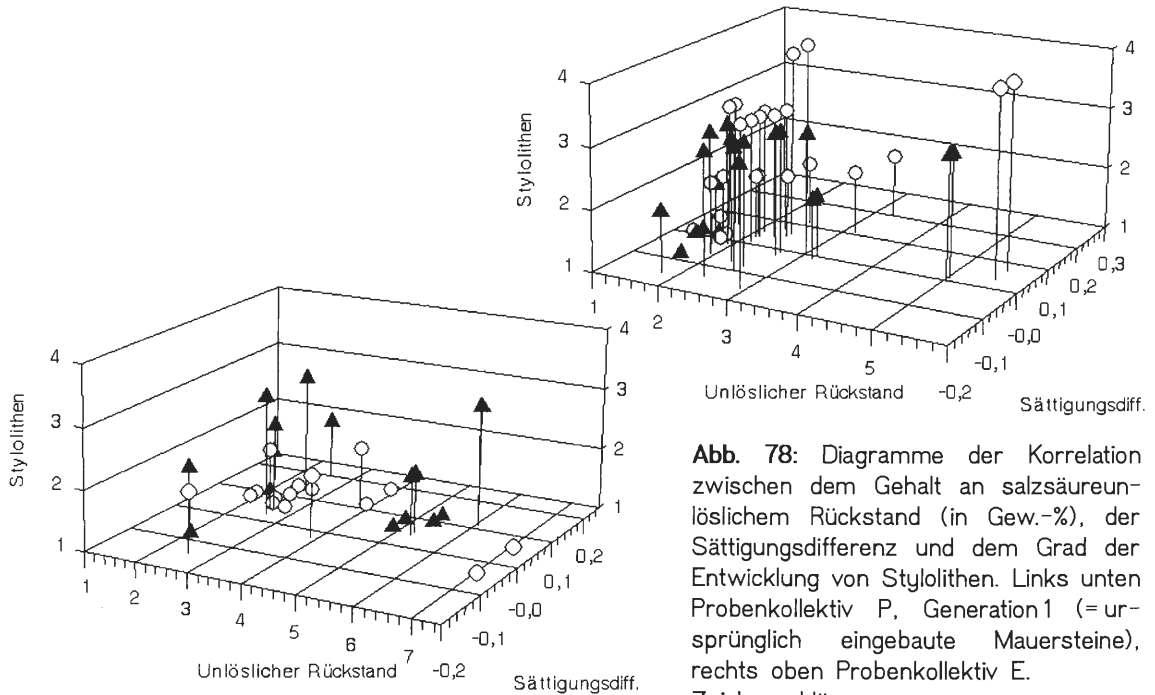


Abb. 78: Diagramme der Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%), der Sättigungsdifferenz und dem Grad der Entwicklung von Stylolithen. Links unten Probenkollektiv P, Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine), rechts oben Probenkollektiv E. Zeichenerklärung:

- ▲ = korrigierter Gefüge-Index der Proben: < 4,6 (Probenkollektiv P), bzw. < 5 (Probenkollektiv E);
- = korrigierter Gefüge-Index der Proben: > 9 (Probenkollektiv P), bzw. > 8 (Probenkollektiv E).

wicklung von Stylolithen sowie der Zunahme des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand nimmt tendenziell der Porositäts-Index zu. In den Probenkollektiven S, P und E, in denen der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ziemlich gering ist und Stylolithen nicht sehr stark entwickelt sind, lassen sich vergleichbare Beziehungen nicht erkennen. Die unter Verwendung der Sättigungsdifferenz erstellten Blockdiagramme (Abb. 77-78) bestätigen die an den Blockdiagrammen mit dem Porositäts-Index gemachten Beobachtungen voll und ganz.

Bei einem Rückblick auf die Auswertungen dieses Kapitels stellt man folgende Unterschiede zwischen den Probenkollektiven fest, die einer Erklärung bedürfen:

- 1) Die Porositätskennwerte freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio haben in allen Probenkollektiven eine große Bedeutung für die Verwitterungsbeständigkeit; aber während sie in ihrem Zusammenwirken im Probenkollektiv K eine leicht erkennbare und dominierende Rolle spielen, ist diese in den Probenkollektiven S und E - und erst recht im Probenkollektiv P - nicht so ausgeprägt.
- 2) Während der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und der Grad der Entwicklung von Stylolithen im Probenkollektiv K die Verwitterungsbeständigkeit deutlich beeinflussen, ist ihr Einfluß im Probenkollektiv S nur noch gering und in den Probenkollektiven P und E nicht mehr nachweisbar.
- 3) Während sich im Probenkollektiv K sehr leicht verwitterungsbeständigere Mikrofaziestypen von weniger verwitterungsbeständigen Mikrofaziestypen unterscheiden lassen, ist eine derartige Unterscheidung in den Probenkollektiven S, P und E nicht so einfach (siehe Kap. 4.2.2.).

Am einfachsten läßt sich 2) erklären: Da der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und die Entwicklung von Stylolithen in den Probenkollektiven S, P und E erheblich geringer als im Probenkollektiv K sind (siehe z. B. Tabelle 1), sollten sie dort die Verwitterungsbeständigkeit auch erheblich weniger beeinflussen.

Ein dem analoger Erklärungsansatz für 1) greift nur beim Probenkollektiv P, das eine erheblich geringere freiwillige Wasseraufnahme und effektive Porosität als das Probenkollektiv K hat, aber nicht beim Probenkollektiv S, dessen Porositätskennwerte sehr gut denen des Probenkollektivs K entsprechen (siehe z. B. Tabelle 1). Hier muß ein in diesem Kapitel bisher noch nicht berücksichtigter Gesteinsparameter eine Rolle spielen. An erster Stelle sind da die Textur-Eigenschaften zu nennen: Während in den Probenkollektiven S, P und E die Kalksteine bankig bis massig, aber nie feingeschichtet sind, bilden im Probenkollektiv K die Mikrofaziestypen 5 und 6 $\pm$ ungeschichtete, dünne Bänke, während die Mikrofaziestypen 7-9 $\pm$ gut feingeschichtet sind. Es konnten aber HARVEY et al. (1974: 17; 1978), GAURI (1990: 52) und ROSSI-MANARESÍ et al. (1992: 570) beobachten, daß feingeschichtete Kalk- und Sandsteine weniger verwitterungsbeständig sind als vergleichbare Gesteine mit dickbankiger oder ungeschichteter Textur.

Feinschichtung kann die Verwitterungsbeständigkeit eines Sedimentes auf zwei Weisen negativ beeinflussen: Zum einen bieten die Schichtflächen als Schwächezonen Angriffspunkte für die Verwitterung, zum anderen können sie die Wasserwegsamkeit erleichtern und somit die für die Verwitterungsbeständigkeit negativen Faktoren Schurecht-Ratio und freiwillige Wasseraufnahme vergrößern.

Hier liegt auch der Schlüssel zu den in 3) aufgeworfenen Fragen: Im Probenkollektiv K wirken alle verwitterungsrelevanten Faktoren synergistisch zusammen und sind in einem relativ hohen Maß an den Mikrofaziestyp gebunden: Die Mikrofaziestypen 7-9 haben für die Verwitterungsbeständigkeit ungünstige Porositätskennwerte (hohe Schurecht-Ratio und relativ große freiwillige Wasseraufnahme) und gleichzeitig eine gute Feinschichtung, die unmittelbar (als Angriffspunkt) und mittelbar (durch Vergrößerung von Schurecht-Ratio und freiwilliger Wasseraufnahme) ebenfalls ungünstig für die Verwitterungsbeständigkeit sind. Desweiteren besitzen die Mikrofaziestypen 7-9 einen relativ hohen Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (siehe Kap. 4.6.1., Abb. 39), der - aufgrund der für beides notwendigen ruhigen Sedimentationsbedingungen - positiv mit der Feinschichtung korreliert. Ein größerer Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ist aber - neben seiner direkten negativen Wirkung auf die Verwitterungsbeständigkeit - auch positiv mit der Entwicklung von Stylolithen korreliert. Die Stylolithen wirken unmittelbar (als Angriffspunkt) und mittelbar (durch Vergrößerung von Schurecht-Ratio und freiwilliger Wasseraufnahme) nachteilig auf die Verwitterungsbeständigkeit des Kalksteins. In den Mikrofaziestypen 5 und 6 sind Porositätskennwerte, Feinschichtung, Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und Stylolithen im Mittel geringer (bzw. schwächer entwickelt) und somit für die Verwitterungsbeständigkeit vorteilhafter. Für das Probenkollektiv K gilt also:

- Alle verwitterungsrelevanten Parameter wirken synergistisch.
- Sämtliche verwitterungsrelevanten Parameter beeinflussen die Porositätskennwerte in gleicher Weise.
- Die verwitterungsrelevanten Parameter sind relativ eng mit den Mikrofaziestypen verknüpft.

Die Probenkollektive S, P und E unterscheiden sich in diesen drei Punkten vom Probenkollektiv K. Die wichtigen, die Verwitterungsbeständigkeit differenzierenden Faktoren Feinschichtung, Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand und Entwicklung von Stylolithen sind gering oder fehlend. Die Mikrofaziestypen unterscheiden sich nicht so deutlich in ihren Porositätskennwerten wie im Probenkollektiv K. Stattdessen tritt mit der Unterscheidung in Kalksteine mit mikritischer Matrix von solchen mit sparitischem Zement ein

verwitterungsrelevanter Parameter in Erscheinung, der von den Porositätskennwerten unabhängig ist und auch nicht synergistisch mit ihnen zusammenwirken muß. Im Probenkollektiv E ist es sogar so, daß diese mikrofazielle Eigenschaft und die Porositätsparameter in bezug auf die Verwitterungsbeständigkeit antagonistisch zusammenwirken. Aus diesen Umständen erklären sich leicht die Beobachtungen 1) und 3).

Für die Praxis bedeutet das: Freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio an erster Stelle sowie Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand an zweiter Stelle beeinflussen die Verwitterungsbeständigkeit eines Kalksteins zwar sehr stark, sie allein reichen aber nicht zu einer sicheren Prognose über seine Verwitterungsbeständigkeit aus. Die Entwicklung von Stylolithen kann eine - aber nur untergeordnete - Bedeutung erlangen. Darüberhinaus spielen für die Verwitterungsbeständigkeit mit dem Mikrofaziestyp verknüpfte Eigenschaften - wie z. B. Feinschichtung und Kristallgröße (Mikrit/Sparit) - eine nicht ganz unwichtige Rolle.

5.2. Auswahl verwitterungsbeständiger Kalksteine

Von den drei Fragen, die am Anfang dieses Kapitels standen, konnten die ersten beiden im vorhergehenden Unterkapitel beantwortet werden, so daß diesem Unterkapitel die letzte Frage vorbehalten bleibt: Welche Vorgehensweisen bieten sich an, um in Kalksteinen besonders verwitterungsbeständige Varietäten zu finden?

Jeder sinnvolle Versuch einer Antwort muß auf den Ergebnissen des vorigen Unterkapitels aufbauen, die lauten: Freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio bestimmen die Verwitterungsbeständigkeit eines Kalksteins am meisten, aber auch der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand, die Entwicklung von Stylolithen und die mit dem Mikrofaziestyp verknüpften Eigenschaften Feinschichtung und Mikrit-Matrix/Sparit-Zement beeinflussen ihre Verwitterungsbeständigkeit. Zu einer zuverlässigen Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit reichen die Porositätskennwerte allein noch nicht aus, wie die Streuung in den entsprechenden Diagrammen des vorherigen Kapitels belegt. Man ist also auf die Berücksichtigung weiterer Parameter angewiesen.

Für die praktische Anwendung - z. B. in einem Algorithmus zum „Herausfiltern“ besonders verwitterungsbeständiger Kalksteine - sind nur leicht zu quantifizierende Parameter gut geeignet, während die mit dem Mikrofaziestyp verknüpften Eigenschaften Feinschichtung und Mikrit-Matrix/Sparit-Zement prinzipiell nur qualitativer Art sind und sich nicht (oder nur sehr schwer) quantifizieren lassen. Deshalb müssen im weiteren die Eigenschaften Feinschichtung und Mikrit-Matrix/Sparit-Zement unberücksichtigt bleiben; das ist für die folgenden Überlegungen aber nicht so gravierend, wie es auf den ersten Blick scheinen mag, da in jedem der bisher untersuchten Probenkollektive jeweils nur eine von beiden Eigenschaften variiert. Allerdings müßte in einem Probenkollektiv, in dem sowohl die Entwicklung von Feinschichtung als auch im Bindemittel das Verhältnis Mikrit/Sparit sehr stark schwanken, das gesondert berücksichtigt werden.

Da für sämtliche leicht quantifizierbaren verwitterungsrelevanten Parameter (Schurecht-Ratio, freiwillige Wasseraufnahme, salzsäureunlöslicher Rückstand, Grad der Entwicklung von Stylolithen) gilt, daß sie mit der Verwitterungsbeständigkeit negativ korrelieren, besteht die einfachste Möglichkeit darin, daß man für den zu untersuchenden Kalkstein diese Parameter an zahlreichen Proben mißt und daraus für jeden Parameter das arithmetische Mittel bildet (siehe Tab. 1). Proben, die in allen Parametern unter dem arithmetischen Mittel liegen, sollten besonders gut verwitterungsbeständig sein, während Proben, die in allen Parametern über dem arithmetischen Mittel liegen, besonders schlecht verwitterungsbeständig sein sollten. Ob diese Annahme auch in der Praxis funktioniert, läßt sich sehr leicht prüfen, indem man dieses Verfahren auf die untersuchten Probenkollektive anwendet. Die Ergebnisse der entsprechenden Datenbank-Abfragen lassen sich am besten in einem Korrelationsdiagramm korrigierter Gefüge-Index gegen Gefüge-Index darstellen (siehe Abb. 79 ff.), in dem die Funktion korrigierter Gefüge-Index = Gefüge-Index als Gerade abgetragen ist, denn in diesem Diagramm gilt:

- Mauersteine, die sich als besonders verwitterungsbeständig erwiesen haben (kleiner korrigierter Gefüge-Index und kleiner Gefüge-Index), werden links unten dargestellt, während solche, die sich als besonders unbeständig erwiesen haben (großer korrigierter Gefüge-Index und großer Gefüge-Index), rechts oben erscheinen.
- Je größer der Dimensions-Index ist, desto weiter ist der Mauerstein von der Gerade korrigierter Gefüge-Index = Gefüge-Index nach rechts verschoben. Da aber bei einem relativ großen Dimensions-Index die Aussage des Mauersteins zur Verwitterungsbeständigkeit nur mit Vorbehalt betrachtet werden darf (siehe ausführliche Diskussion im Kap. 4.1.3.), kann man an der Gerade ansatzweise abschätzen, wie aussagekräftig dieser Mauerstein ist. Als Faustregel kann gelten: Je näher ein Mauerstein an der Gerade liegt, desto aussagekräftiger ist seine Position.

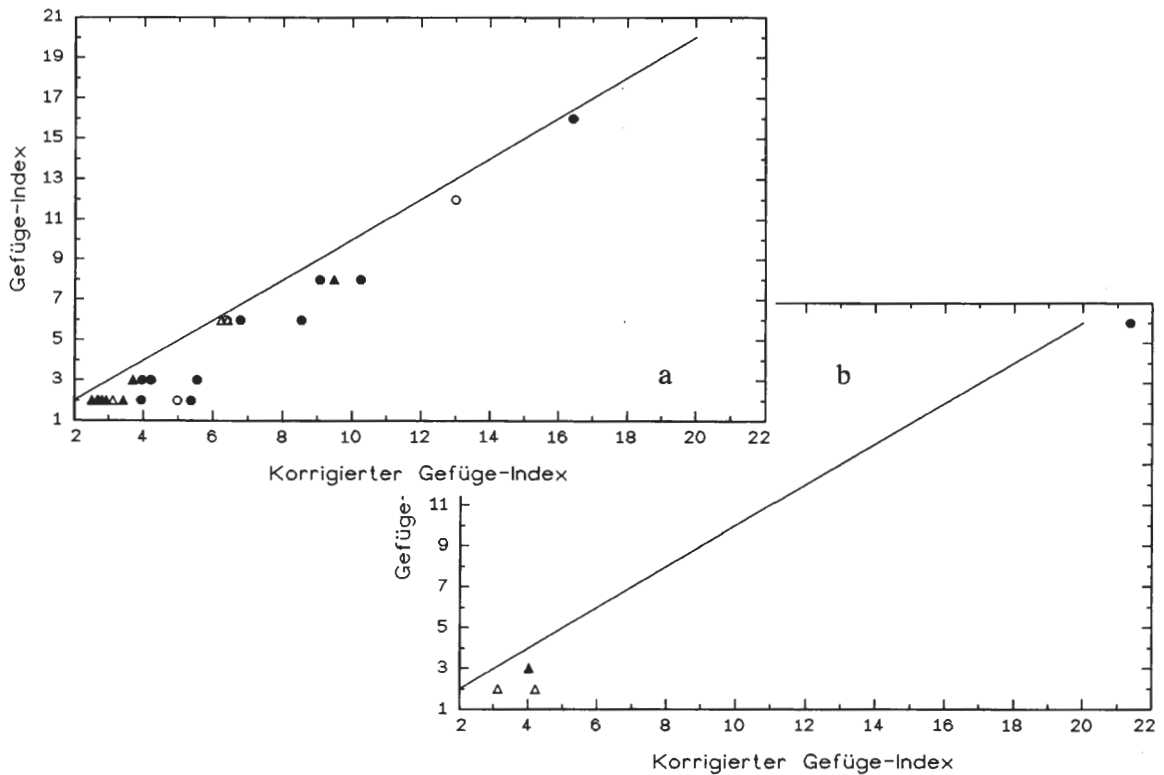


Abb. 79: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: ▲ / schlecht: ●○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index.

Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv K (links oben) = Mikrofaziestyp 5–9:

- ▲ = Schurecht-Ratio < 0,7031; freiwillige Wasseraufnahme < 1,78 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand < 14,46 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 2,7.
- △ = wie ▲, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.
- = Schurecht-Ratio > 0,7031; freiwillige Wasseraufnahme > 1,78 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand > 14,46 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 2,7.
- = wie ●, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

b) Probenkollektiv S (rechts unten) = Mikrofaziestyp 1–4:

- ▲ = Schurecht-Ratio < 0,7808; freiwillige Wasseraufnahme < 1,94 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand < 3,38 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 1,8.
- △ = wie ▲, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.
- = Schurecht-Ratio > 0,7808; freiwillige Wasseraufnahme > 1,94 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand > 3,38 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 1,8.
- = wie ●, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

In Abb. 79 sieht man die Anwendung des oben beschriebenen Verfahrens und dieses Diagramms auf die Probenkollektive K und S. Für beide Probenkollektive gilt, daß dieses Verfahren nur wenige Mauersteine als besonders gut (bzw. besonders schlecht) verwitterungsbeständig auswählt. Die allermeisten Mauersteine lassen sich keiner von beiden Kategorien zuordnen und werden deshalb nicht dargestellt. Wenn man darauf verzichtet, die Entwicklung der Stylolithen als differenzierendes Kriterium zu verwenden, werden ein paar Mauersteine mehr dargestellt, aber das Bild der Verteilung ändert sich nicht. Es ist also nicht notwendig, die Entwicklung von Stylolithen zu berücksichtigen. Die als besonders gut verwitterungsbeständig ausgewählten Mauersteine liegen - wie prognostiziert - links unten im Diagramm. Demgegenüber treten als besonders schlecht verwitterungsbeständig ausgewählte Mauersteine nicht nur rechts oben, sondern im Probenkollektiv K auch links unten auf. Das ist aus zwei Gründen nicht so bedenklich, wie es auf den ersten Blick scheinen mag, denn

- die als besonders schlecht verwitterungsbeständig ausgewählten Mauersteine in der linken unteren Ecke sind ziemlich weit von der Gerade korrigierter Gefüge-Index = Gefüge-Index entfernt und deshalb nicht so sehr aussagekräftig.
- da das Ziel der Auswahl ist, besonders gut verwitterungsbeständige Mauersteine zu finden, ist es nicht sehr schlimm, wenn im Einzelfall die Verwitterungsbeständigkeit unterschätzt wird. Verheerender wäre es, wenn als gut ausgewählte Steine im Diagramm weit rechts oben erscheinen würden!

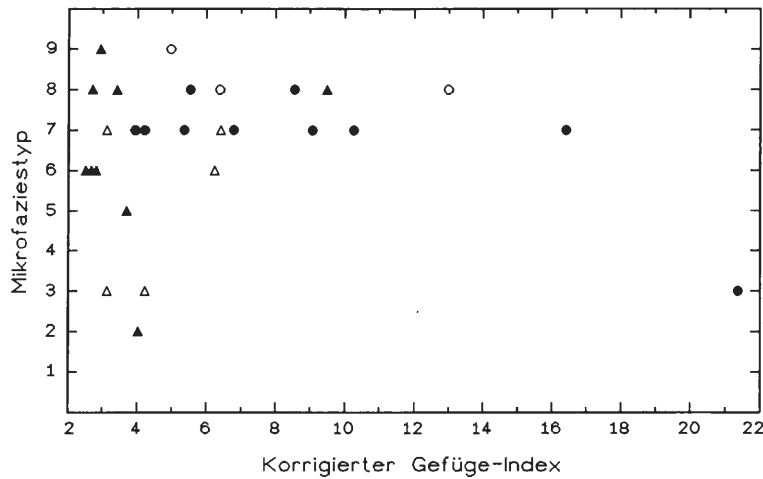


Abb. 80: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Abb. 79) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: ▲▲ / schlecht: ●○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Mikrofaziestyp. Probenkollektiv K (= Mikrofaziestyp 5–9) und Probenkollektiv S (= Mikrofaziestyp 1–4). Zeichenerklärung siehe Abb. 79.

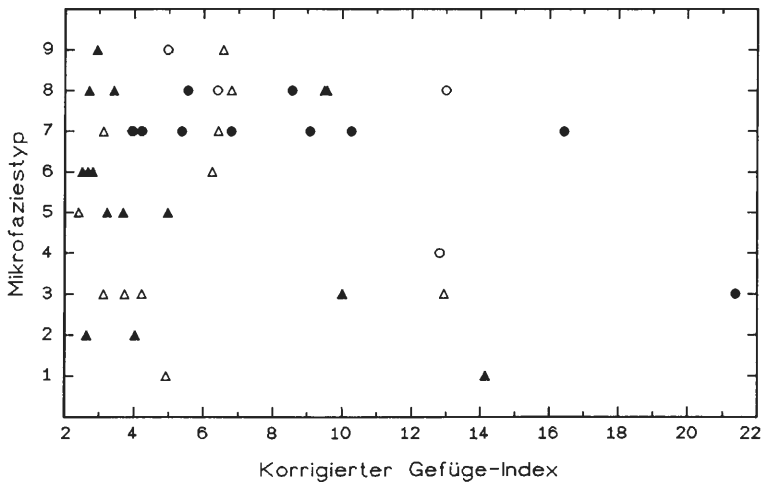


Abb. 81: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Abb. 82) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: ▲▲ / schlecht: ●○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Mikrofaziestyp. Probenkollektiv K (= Mikrofaziestyp 5–9) und Probenkollektiv S (= Mikrofaziestyp 1–4). Zeichenerklärung siehe Abb. 82.

Als Resümee läßt sich feststellen, daß eine Auswahl nach dem Kriterium, daß Schurecht-Ratio, freiwillige Wasseraufnahme und salzsäureunlöslicher Rückstand unter dem arithmetischen Mittel liegen, in den Probenkollektiven K und S zwar nur wenige Mauersteine liefert, die aber immer überdurchschnittlich (bis durchschnittlich) verwitterungsbeständig sind. Als nächster Schritt werden die so ausgewählten Mauersteine in ein Korrelationsdiagramm Mikrofaziestyp gegen korrigierter Gefüge-Index eingetragen (Abb. 80). In diesem Diagramm sind die Mikrofaziestypen 2, 5 und 6 nur mit als besonders gut verwitterungsbeständig ausge-

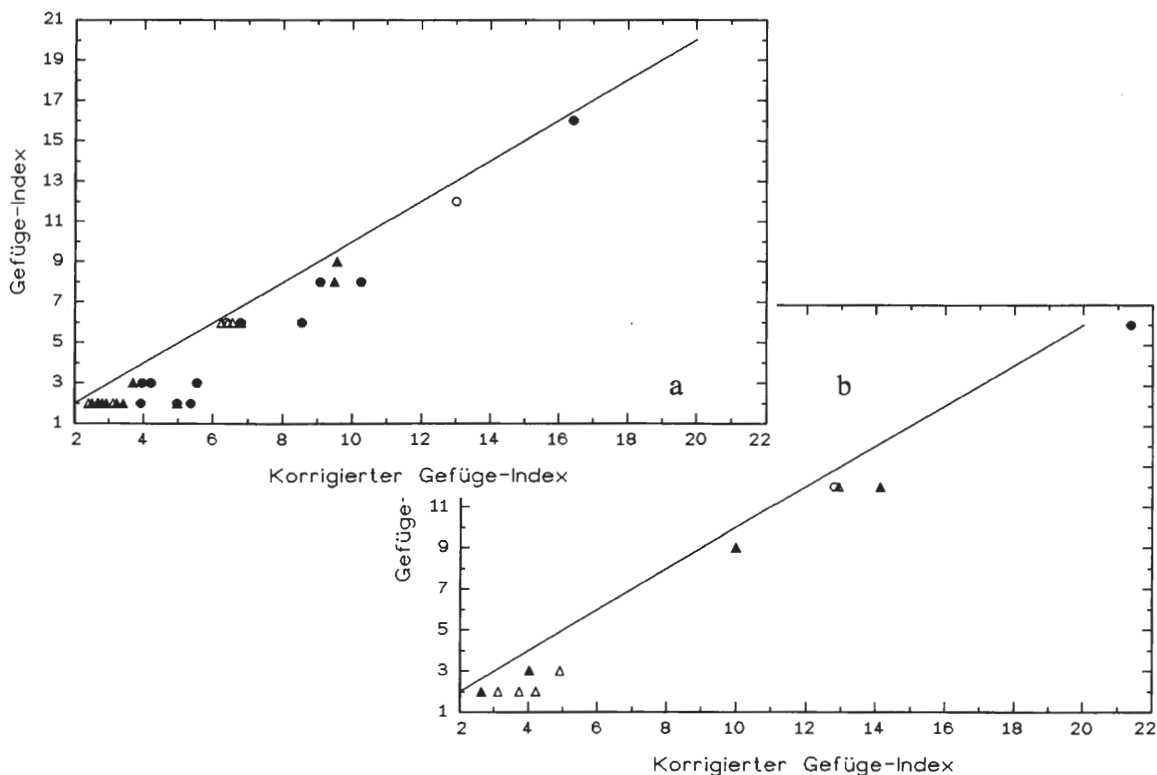


Abb. 82: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: ▲△ / schlecht: ●○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index. Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv K (links oben) = Mikrofaziestyp 5–9:

▲ = Porositäts-Index < 1,3646; salzsäureunlöslicher Rückstand < 14,46 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 2,7.

△ = wie ▲, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

● = Porositäts-Index > 1,3646; salzsäureunlöslicher Rückstand > 14,46 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 2,7.

○ = wie ●, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

b) Probenkollektiv S (rechts unten) = Mikrofaziestyp 1–4:

▲ = Porositäts-Index < 1,5068; salzsäureunlöslicher Rückstand < 3,38 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 1,8.

△ = wie ▲, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

● = Porositäts-Index > 1,5068; salzsäureunlöslicher Rückstand > 3,38 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 1,8.

○ = wie ●, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

wählten Mauersteinen belegt, während der Mikrofaziestyp 7 ein deutliches Übergewicht von als besonders schlecht verwitterungsbeständig ausgewählten Mauersteinen zeigt. Hierin bestätigen sich im Kap. 4.2.2. beschriebene Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen den verschiedenen Mikrofaziestypen.

Da das oben beschriebene Auswahlverfahren nur unbefriedigend wenig Mauersteine auswählt, wird in den Abb. 81–82 ein modifiziertes Verfahren angewandt. Statt des arithmetischen Mittels von freiwilliger Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio wird hier das arithmetische Mittel des Porositäts-Indexes benutzt. Das führt zu einigen wichtigen Veränderungen des entstehenden Bildes: Zwar werden in den Probenkollektiven K und S erheblich mehr Mauersteine ausgewählt, aber dafür befinden sich unter den als besonders gut verwitterungsbeständig ausgewählten Mauersteinen auch solche mit überdurchschnittlich hohem Gefüge-Index und korrigiertem Gefüge-Index. Aufgrund dieser falsch eingestuft Mauersteine – die auch die Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit der Mikrofaziestypen etwas verfälschen – ist dieses Verfah-

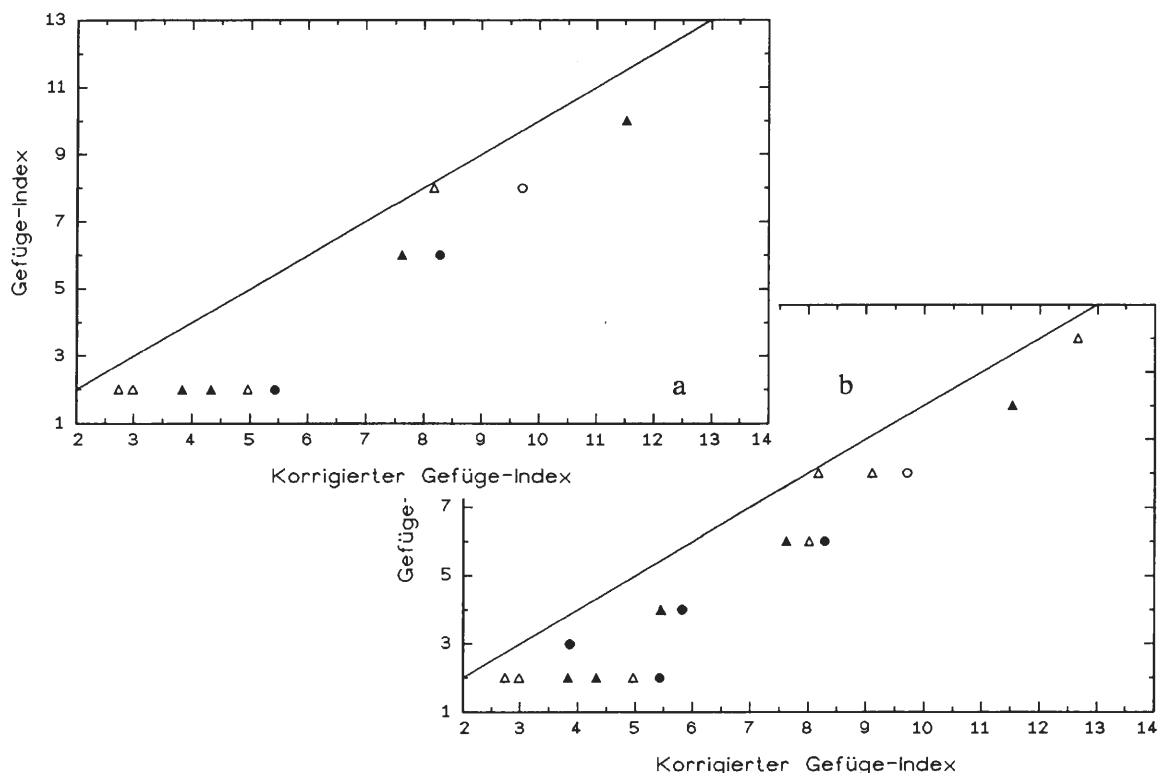


Abb. 83: Nach jeweils einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: ▲△ / schlecht: ●○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index. Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv E (links oben), Kriterienkatalog:

▲ = Schurecht-Ratio < 0,784; freiwillige Wasseraufnahme < 1,46 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand < 2,78 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 2,6.

△ = wie ▲, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

● = Schurecht-Ratio > 0,784; freiwillige Wasseraufnahme > 1,46 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand > 2,78 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 2,6.

○ = wie ●, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

b) Probenkollektiv E (rechts unten), Kriterienkatalog:

▲ = Porositäts-Index < 1,155; salzsäureunlöslicher Rückstand < 2,78 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 2,6.

△ = wie ▲, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

● = Porositäts-Index > 1,155; salzsäureunlöslicher Rückstand > 2,78 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 2,6.

○ = wie ●, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

ren nicht empfehlenswert. Erwähnt sei noch, daß die Berücksichtigung der Stylolithen auch hier das Bild nicht sonderlich verändert.

Die Anwendung der bisher in diesem Unterkapitel an den Probenkollektiven K und S erprobten Diagramme auf die Probenkollektive P und E erbringt ein vergleichbares Bild (siehe Abb. 83-85); denn auch hier ergibt die gemeinsame Verwendung des arithmetischen Mittels von Schurecht-Ratio und freiwilliger Wasseraufnahme eine bessere Trennung als die Verwendung des arithmetischen Mittels des Porositäts-Indexes. Allerdings schlagen sich die auf der sehr geringen Porosität beruhenden Besonderheiten des Probenkollektivs P in einer großen Streuung der ausgewählten Proben nieder. Noch unbefriedigender wirkt die Methode beim Probenkollektiv E, in dem sich unter den als besonders gut verwitterungsbeständig ausgewählten Mauersteinen auch mehrere mit überdurchschnittlich hohem Gefüge-Index und korrigiertem Gefüge-Index befinden. Der geringe Erfolg beim Probenkollektiv E ist meines Erachtens darauf zurückzuführen, daß dort

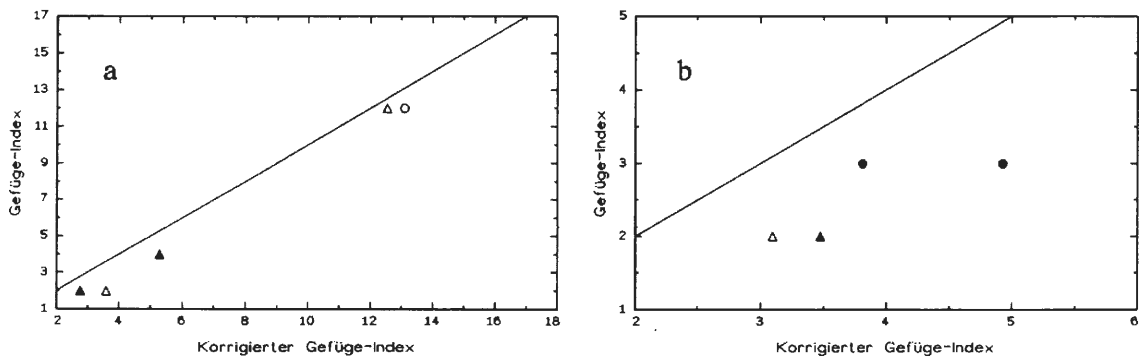


Abb. 84: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: $\blacktriangle$ / schlecht: $\bullet$), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index. Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv P, Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine):

$\blacktriangle$ = Schurecht-Ratio < 0,909; freiwillige Wasseraufnahme < 0,55 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand < 3,26 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 1,6.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\circ$ = Schurecht-Ratio > 0,909; freiwillige Wasseraufnahme > 0,55 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand > 3,26 Gew.-%.

b) Probenkollektiv P, Generation 2 (= nachträglich eingebaute Mauersteine):

$\blacktriangle$ = Schurecht-Ratio < 0,918; freiwillige Wasseraufnahme < 0,43 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand < 1,60 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 1,5.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\bullet$ = Schurecht-Ratio > 0,918; freiwillige Wasseraufnahme > 0,43 Vol.-%; salzsäureunlöslicher Rückstand > 1,60 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 1,5.

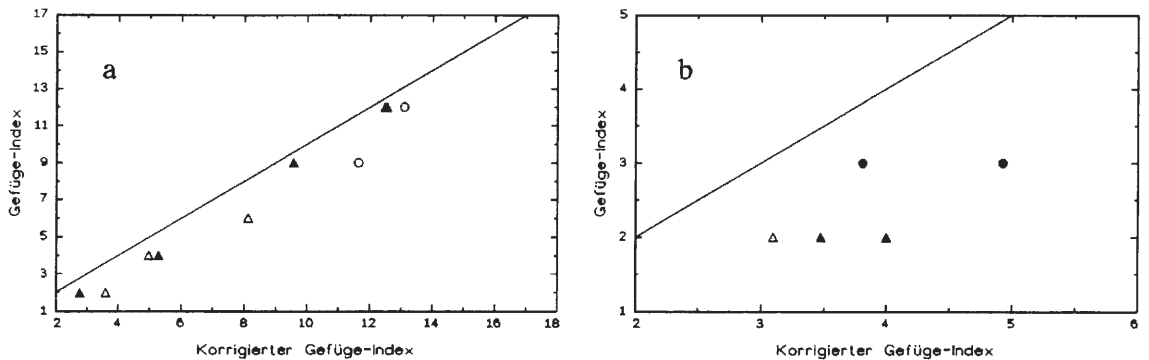


Abb. 85: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: $\blacktriangle$ / schlecht: $\bullet$), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index. Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv P, Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine):

$\blacktriangle$ = Porositäts-Index < 0,499; salzsäureunlöslicher Rückstand < 3,26 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 1,6.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\bullet$ = Porositäts-Index > 0,499; salzsäureunlöslicher Rückstand > 3,26 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 1,6.

$\circ$ = wie $\bullet$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

b) Probenkollektiv P, Generation 2 (= nachträglich eingebaute Mauersteine):

$\blacktriangle$ = Porositäts-Index < 0,397; salzsäureunlöslicher Rückstand < 1,60 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 1,5.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\bullet$ = Porositäts-Index > 0,397; salzsäureunlöslicher Rückstand > 1,60 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 1,5.

das antagonistische Zusammenspiel zwischen den Porositätsparametern und den mikrofaziellen Gefüge-Eigenschaften störend wirkt und die Prognose der Verwitterungsbeständigkeit erschwert.

Da die bisher diskutierten Verfahren keine voll befriedigenden Ergebnisse erbracht haben, wird schließlich die Sättigungsdifferenz als diskriminierender Porositätsparameter eingesetzt (Sättigungsdifferenz = $\text{Schurecht-Ratio}_{\text{Probe}} - \text{Schurecht-Ratio}_{\text{Grenzlinie}}$). Die Ergebnisse dieser Auswahl liefern die Abb. 86-90. Sie sind erheblich besser als die der anderen Verfahren; denn obwohl in den Probenkollektiven K und S verhältnismäßig viele Mauersteine als besonders gut verwitterungsbeständig ausgewählt werden, sind die als besonders gut ausgewählten Mauersteine auf den Bereich mit relativ niedrigem Gefüge-Index und korrigiertem Gefüge-Index beschränkt. Für das Probenkollektiv K wird auch deutlich die unterschiedliche Verwitterungsbeständigkeit der verschiedenen Mikrofaziestypen herausgearbeitet. Daß für das Probenkollektiv P nur sehr wenige Mauersteine als besonders gut verwitterungsbeständig ausgewählt werden, liegt an seinen Porositätskennwerten; das Ergebnis ist aber überhaupt nicht so unrealistisch, wenn man sich bewußt macht,

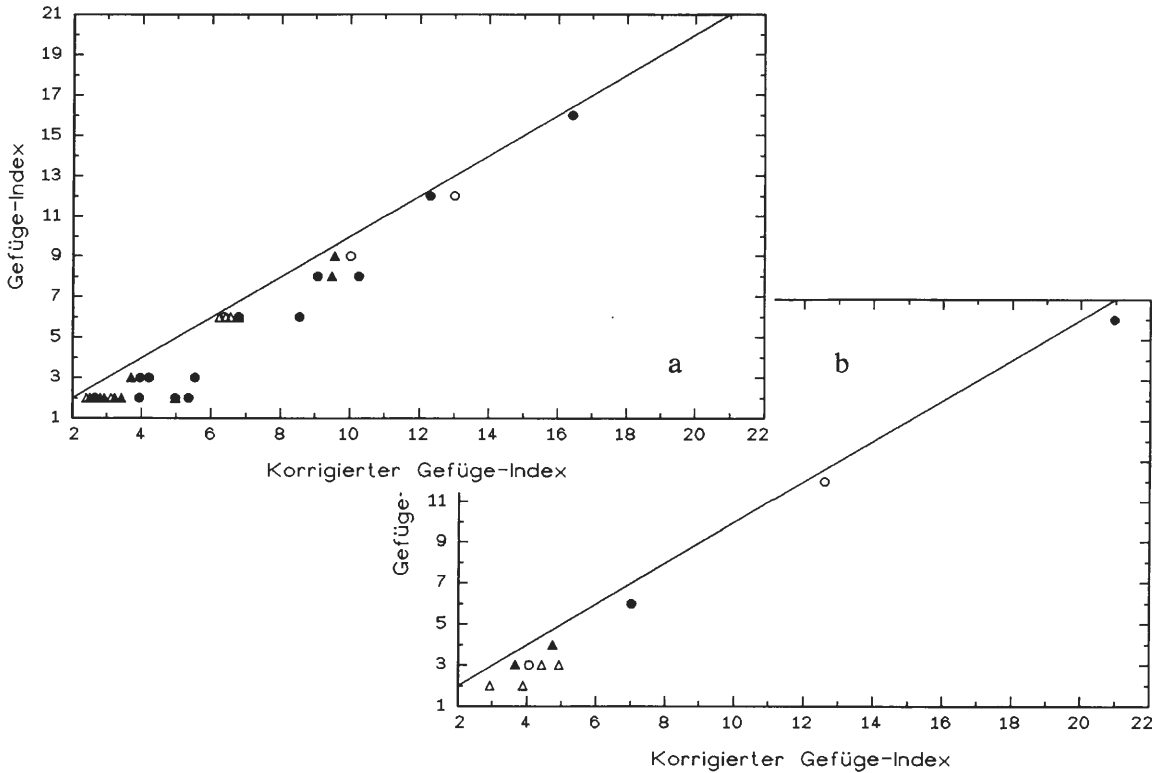


Abb. 86: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: $\blacktriangle$ / schlecht: $\bullet$), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index. Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv K (links oben) = Mikrofaziestyp 5-9:

$\blacktriangle$ = Sättigungsdifferenz < 0; salzsäureunlöslicher Rückstand < 14,46 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 2,7.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\bullet$ = Sättigungsdifferenz > 0; salzsäureunlöslicher Rückstand > 14,46 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 2,7.

$\circ$ = wie $\bullet$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

b) Probenkollektiv S (rechts unten) = Mikrofaziestyp 1-4:

$\blacktriangle$ = Sättigungsdifferenz < 0; salzsäureunlöslicher Rückstand < 3,38 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 1,8.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\bullet$ = Sättigungsdifferenz > 0; salzsäureunlöslicher Rückstand > 3,38 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 1,8.

$\circ$ = wie $\bullet$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

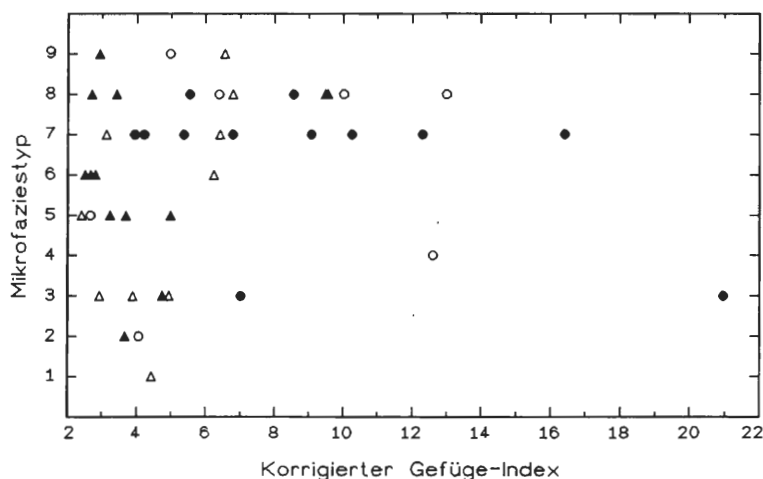


Abb. 87: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Abb. 86) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: ▲ / schlecht: ●○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Mikrofaziestyp. Probenkollektiv K (= Mikrofaziestyp 5–9) und Probenkollektiv S (= Mikrofaziestyp 1–4). Zeichenerklärung siehe Abb. 86.

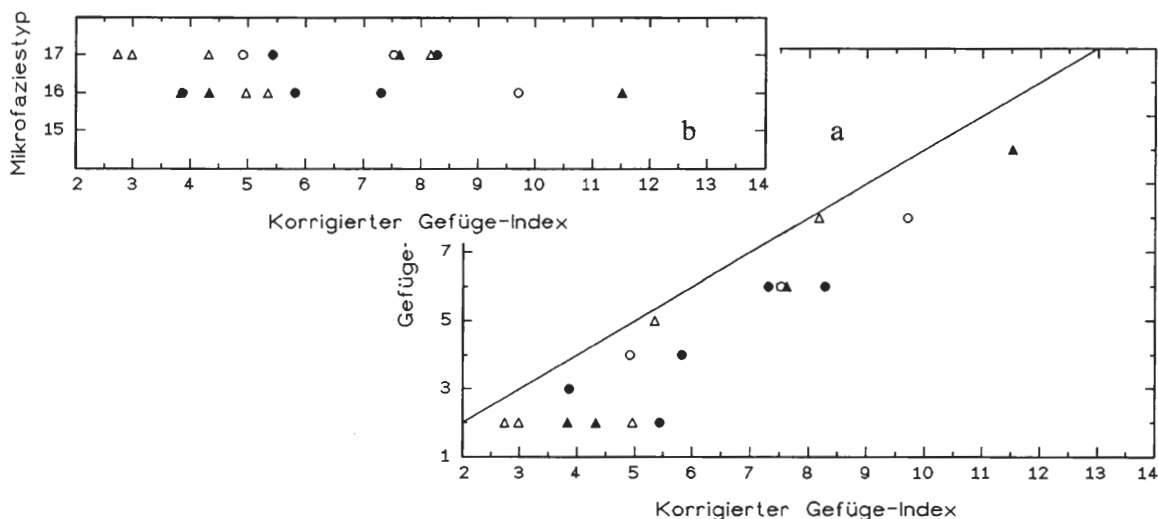


Abb. 88: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: ▲ / schlecht: ●○), eingetragen a) in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index, bzw. b) in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Mikrofaziestyp. Probenkollektiv E. Zeichenerklärung:

- ▲ = Sättigungsdifferenz < 0; salzsäureunlöslicher Rückstand < 2,78 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen < 2,6.
- △ = wie ▲, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.
- = Sättigungsdifferenz > 0; salzsäureunlöslicher Rückstand > 2,78 Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen > 2,6.
- = wie ●, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

daß das Probenkollektiv P an einem Bauwerk mit starken Schäden entnommen wurde, dieser Kalkstein also insgesamt nicht sehr verwitterungsbeständig war. Beim Probenkollektiv E führt die Berücksichtigung der Sättigungsdifferenz zwar zu einer Verbesserung der Auswahl besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständiger Mauersteine; trotzdem ist die Trennschärfe nicht befriedigend - offensichtlich ist der störende

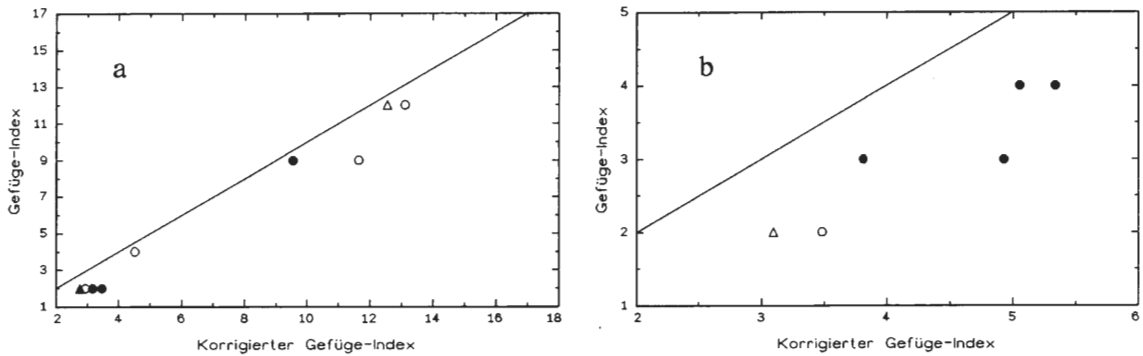


Abb. 89: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: $\blacktriangle$ / schlecht: $\bullet$ ○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Gefüge-Index. Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv P, Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine):

$\blacktriangle$ = Sättigungsdifferenz < 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $< 3,26$ Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen $< 1,6$.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\bullet$ = Sättigungsdifferenz > 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $> 3,26$ Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen $> 1,6$.

○ = wie $\bullet$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

b) Probenkollektiv P, Generation 2 (= nachträglich eingebaute Mauersteine):

$\triangle$ = Sättigungsdifferenz < 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $< 1,60$ Gew.-%.

$\bullet$ = Sättigungsdifferenz > 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $> 1,60$ Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen $> 1,5$.

○ = wie $\bullet$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

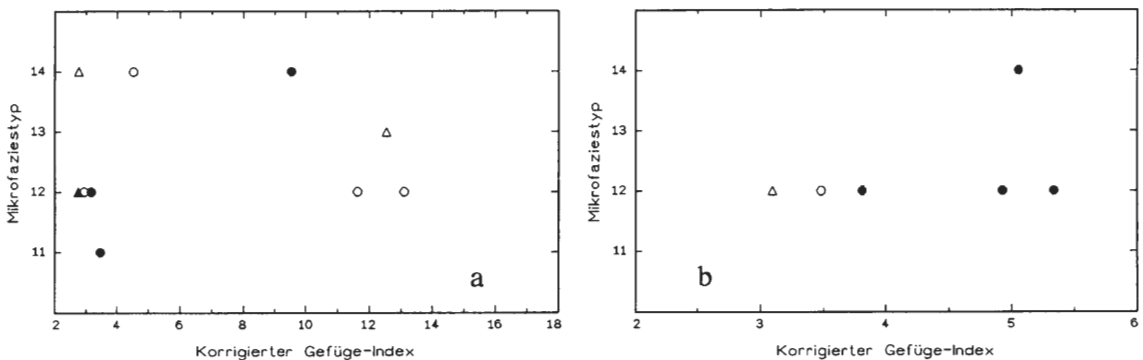


Abb. 90: Nach einem Kriterienkatalog (siehe Zeichenerklärung) ausgewählte besonders gut bzw. schlecht verwitterungsbeständige Mauersteine (gut: $\blacktriangle$ / schlecht: $\bullet$ ○), eingetragen in das Diagramm der Korrelation zwischen dem korrigierten Gefüge-Index und dem Mikrofaziestyp. Zeichenerklärung:

a) Probenkollektiv P, Generation 1 (= ursprünglich eingebaute Mauersteine):

$\blacktriangle$ = Sättigungsdifferenz < 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $< 3,26$ Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen $< 1,6$.

$\triangle$ = wie $\blacktriangle$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

$\bullet$ = Sättigungsdifferenz > 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $> 3,26$ Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen $> 1,6$.

○ = wie $\bullet$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

b) Probenkollektiv P, Generation 2 (= nachträglich eingebaute Mauersteine):

$\triangle$ = Sättigungsdifferenz < 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $< 1,60$ Gew.-%.

$\bullet$ = Sättigungsdifferenz > 0 ; salzsäureunlöslicher Rückstand $> 1,60$ Gew.-%; Grad der Entwicklung von Stylolithen $> 1,5$.

○ = wie $\bullet$, nur ohne die Berücksichtigung des Grades der Entwicklung von Stylolithen.

Einfluß des Antagonismus zwischen den Porositätsparametern und den mikrofaziellen Gefüge-Eigenschaften zu groß. Auch bei diesem Auswahlverfahren spielen Styolithen in allen Probenkollektiven keine Rolle.

Rückblickend läßt sich feststellen, daß eine Auswahl innerhalb eines Kalksteins nach den Kriterien Sättigungsdifferenz < 0 und Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand kleiner als das arithmetische Mittel eine große Anzahl überdurchschnittlich verwitterungsbeständiger Mauersteine liefert. Sie stellt damit eine gute und verhältnismäßig leicht durchführbare Möglichkeit zur Qualitätssicherung und -verbesserung dar. In der Praxis könnte es so aussehen, daß man einen Steinbruch, dem man Werksteine entnehmen möchte, systematisch beprobt - bankweise oder (bei lateralen Fazieswechseln) gleichmäßig über die gesamte Fläche. Danach werden die Sättigungsdifferenz und der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand an den Proben gemessen - beides Parameter, die sich ohne großen Aufwand erfassen lassen -, und schon ist es möglich, die Bänke oder Bereiche mit den voraussichtlich verwitterungsbeständigsten Kalksteinen abzugrenzen. Wenn es Hinweise darauf gibt, daß im zu bewertenden Kalkstein sehr unterschiedliche Mikrofaziestypen nebeneinander auftreten, kann zum Abschluß der Untersuchungen dann noch eine Dünnschliff-Untersuchung (mit Mikrofazies-Analyse) erfolgen.

In den letzten Jahren gewinnt eine neue Form der Logik - die sogenannte „Fuzzy Logic“ - immer größere praktische Bedeutung. Der Siegeszug dieser „unscharfen“ Logik beruht auf ihrer Fähigkeit, aus unscharfen, bzw. ungenauen Daten und ziemlich einfachen Handlungsanweisungen oder Prinzipien, die nicht durch scharfe Grenzwerte definiert sind, zu klaren und sinnvollen Ergebnissen zu führen. Gerade diese Fähigkeit gab den Grund für die Erwartung, daß eine Anwendung der Fuzzy Logic zur Prognose der Verwitterungsbeständigkeit interessante Ergebnisse ergeben könnte. Deshalb wurden von mir verschiedene mathematische Modelle auf der Basis der Fuzzy Logic entwickelt und erprobt. Die Ergebnisse der Erprobung sind aber nicht positiv genug, um eine ausführliche Darstellung im Rahmen dieser Arbeit zu rechtfertigen. Sie zeigen, daß die Fuzzy Logic in der Zukunft wahrscheinlich wichtige Beiträge zur Prognose der Verwitterungsbeständigkeit von Naturbausteinen leisten kann; aber im Augenblick ist dazu die Datenbasis noch zu gering. Während innerhalb eines Probenkollektivs Trends ziemlich zuverlässig erkannt werden können, ist die Entwicklung eines für Kalksteine allgemein gültigen mathematischen Modells noch nicht gelungen. So führt z. B. der Unterschied zwischen dem synergistischen Verhalten der verwitterungsrelevanten Gesteinsparameter in den Probenkollektiven K und S zum antagonistischen Verhalten der verwitterungsrelevanten Gesteinsparameter im Probenkollektiv E dazu, daß sich das Verwitterungsverhalten der Probenkollektive K und S durch andere mathematische Modelle prognostizieren läßt als das Verwitterungsverhalten des Probenkollektivs E.

6. Zusammenhänge zwischen Sedimentologie und Verwitterungsbeständigkeit

Die in dieser Arbeit an den Kalksteinen durchgeführten Untersuchungen zeigten einige auffällige Zusammenhänge zwischen dem Mikrofaziestyp und der Verwitterungsbeständigkeit. Aus dem Mikrofaziestyp und anderen sedimentologischen Daten lassen sich die Entstehungsbedingungen der Kalksteine rekonstruieren. Dadurch wird es möglich, etwaige Verknüpfungen zwischen den Entstehungsbedingungen und der Verwitterungsbeständigkeit bestimmter Kalksteine aufzudecken. Sollte sich dabei herausstellen, daß Kalksteine, die in bestimmten sedimentären Environments entstanden, verwitterungsbeständiger sind als solche aus anderen sedimentären Environments, könnte das die Suche nach Lagerstätten verwitterungsbeständiger Kalksteine sehr erleichtern.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde im Kapitel 4.2.1. bei der Beschreibung der Mikrofaziestypen soviel Mühe auf die Vergleiche mit Literaturangaben und die Analyse von sedimentärem Environment und Genese verwandt. Deshalb bauen die folgenden Ausführungen auf den im Kap. 4.2.1. dargestellten Ergebnissen auf und versuchen, unter Berücksichtigung der Aufschlußaufnahmen (Kap. 3.2.3., 3.3.2., 3.4.2.) und mit Hilfe der Literatur diese Zusammenhänge zu erhellen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit folgt die weitere Darstellung der Stratigraphie und nicht (wie bisher) der Reihenfolge der Bearbeitung der Probenkollektive. Am Schluß soll dann versucht werden, allgemeine Trends herauszuarbeiten.

6.1. Beisinghäuser Kalk des Devons

Der Beisinghäuser Kalk ist der älteste in dieser Arbeit untersuchte Kalkstein, da er dem mittleren bis oberen Devon entstammt. Über sandig-siltig-tonigen Gesteinen, die bis in das tiefere Givetium reichen (MÜLLER in EBERT & MÜLLER 1973: 93-100), folgt der Beisinghäuser Kalk, dessen Sedimentation in der oberen *varcus*-Conodontenzone des Givetiums begann (GAUGLITZ 1967: 23; MÜLLER in EBERT & MÜLLER 1973: 105). [Damit setzte der Beisinghäuser Kalk etwas später ein als die Massenkalk-Riffbildung im Nordwest-Sauerland (siehe MAY 1993: 11-13; vgl. auch KOCH-FRÜCHTL & FRÜCHTL 1993: 52-53) und die ältesten Riffschutt-Kalke des Briloner Riffs im Ost-Sauerland (STRITZKE 1990: 276, 290). Auch im Bereich des Attendorner-Elssper Riffkomplexes scheint der Beginn der Massenkalk-Riffbildung etwas eher (vergleichbar dem Nordwest-Sauerland) als die Sedimentation des Beisinghäuser Kalkes erfolgt zu sein (siehe GWOSDZ 1972: 16; MÜLLER in EBERT & MÜLLER 1973: 83).]

Der Beisinghäuser Kalk reichte bis an die Grenze Mittlere/Obere *asymmetricus*-Conodontenzone im Frasnium (GAUGLITZ 1967: 23). Übereinstimmend zeigen die Untersuchungen von MEISCHNER (1964), GAUGLITZ (1967), EDER et al. (1983) und dieser Arbeit, daß der Beisinghäuser Kalk ein Kalkturbidit ist. GAUGLITZ (1967: Abb. 20) nahm an, daß die Kalkturbidite von Beisinghausen - d. h. der im Kap. 3.3.2. beschriebenen Steinbrüche - aus dem ca. 15 km südwestlich gelegenen Attendorner Massenkalk-Riff eingeschüttet wurden. EDER et al. (1983: 102) konnten diese Ansicht durch die Untersuchung einer geröllführenden Bank im Beisinghäuser Kalk bestätigen.

Welchen Bau das den Schutt liefernde Attendorner Massenkalk-Riff hatte, ist noch nicht endgültig geklärt. GWOSDZ (1972: 37-38) hält es für ein Atoll; da aber diese Rekonstruktion auf der Interpretation von Schuttkalken mit Riffbildnern in situ als Riffkern (GWOSDZ 1972: 17) basiert, ohne daß eine detaillierte Mikrofazies-Analyse mit Deutung der Ablagerungsbedingungen erfolgt wäre, kann das Atoll-Modell noch nicht als gesichert gelten. In einem rezenten Atoll ist der Riffkern über die Umgebung erhaben, schnürt die Lagune (bzw. das „back reef“) ab und fällt ziemlich steil zum „fore reef“ ab, in dem ± grober Schutt sedimentiert wird. Eine Alternative zum Atoll-Modell bietet das von MAY (1987: 71) für das Briloner Massenkalk-Riff des Ost-Sauerlandes entwickelte Konzept (siehe Abb. 91), das SCHUDACK (1993) auf den Massenkalk von Asbeck im Nordwest-Sauerland anwendet: Ausgehend von der Beobachtung, daß die den Hauptteil des mittel- bis oberdevonischen Massenkalkes bildenden lagunären Sedimente auf einer weit ausgedehnten Plattform im wesentlichen im Intertidal entstanden (= „tidal flat“), während die Sedimente des sogenannten „Riffkerns“ durchgängig dem Subtidal angehörten - wahrscheinlich also etwas tiefer als die Plattform lagen -, läßt sich schließen, daß die Sedimente des „Riffkerns“ nicht über die Umgebung erhaben waren und eine Lagune einschnürten, sondern das obere Ende des beckenwärts gerichteten Abhanges der Karbonat-Plattform bildeten. Hier waren die Turbulenz und der Nährstoffreichtum des Meereswassers auch groß genug, um ein reiches Wachstum von Riffbildnern und Crinoiden zu ermöglichen. Ein ähnliches Konzept diskutiert auch MACHEL (1990: 58-59, Abb. 3c) (vgl. MACHEL & HUNTER 1994: 168-170). Für eine Übertragbarkeit dieses Konzeptes vom Briloner Massenkalk-Riff auf das Attendorner Massenkalk-Riff spricht neben der Vergleichbarkeit der Fazies und des Alters auch die vergleichbare paläogeographische Position: Beide Riffe liegen am von Nordosten nach Südwesten verlaufenden südlichen Schelfrand des Old-Red-Kontinentes (KREBS 1974: 164-165; EDER et al. 1983: 103).

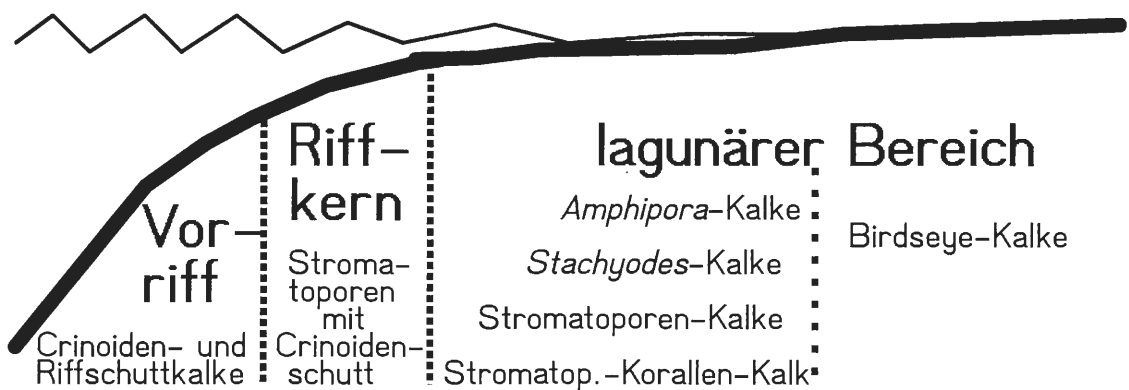


Abb. 91: Skizze des von MAY (1987: 71) für das Briloner Massenkalk-Riff entwickelten Konzeptes.

Eine Anwendung des von MAY (1987: 71) entwickelten Konzeptes auf das Attendorner Massenkalk-Riff erklärt sehr gut die Partikel-Zusammensetzung im Beisinghäuser Kalk (vgl. Mikrofaziestypen 11-14 im Kap. 4.2.1.): Aus dem lagunären Bereich der Karbonat-Plattform stammen sicher der größte Teil der Lumps sowie die Calcisphaeren, die Foraminiferen und die Kalkalgen. Auch ein Teil der Riffbildner-Reste - insbesondere die *Amphipora*-Fragmente (vgl. z. B.: KREBS 1974: 178; FLÜGEL & HÖTZL 1976: 28; MAY 1988: 183-184, 187-188; RACKI 1993: 111) - und zumindest ein großer Teil der „mikritischen Körner“ dürfte aus dem lagunären Bereich kommen. Der Echinodermenschutt stammt aus dem sogenannten „Riffkern“ am oberen Ende des beckenwärts gerichteten Abhanges der Karbonat-Plattformen und benachbarten - wahrscheinlich bathymetrisch direkt darunter folgenden - Crinoiden-„Wäldern“. Da die Echinodermen-Reste durchgängig eine der häufigsten Partikel-Gruppen sind, muß man konstatieren, daß ein Großteil des sogenannten „Riffschuttes“ der Kalkturbidite nicht durch Erosion des Riffes, sondern durch den postmortalen Zerfall von Crinoiden im obersten Teil des Vorriffes produziert wurde. Nur ein Teil der Riffbildner-Fragmente - insbesondere die nicht *Amphipora*-artigen Stromatoporen - läßt sich mit einer gewissen Berechtigung als Erosionsschutt des „Riffkerns“ interpretieren. Selbst wenn man auch die *Renalcis*-ähnlichen Reste unter den Lumps aus dem „Riffkern“ ableitet (siehe MAY 1994a: 203; 1994e: 21), ist eine „Riffkern“-Herkunft nur für einen kleinen Ausschnitt des Partikel-Spektrums plausibel. Sogar die Intraklasten erweisen sich zumindest zum Teil als durch Suspensionsströme wiederaufgearbeitete Teile älterer Kalkturbidite - aus Gesteinen des Mikrofaziestyps 13 bestehende Intraklasten sind sicher Turbidite, während die Intraklasten mikritischer Kalke zu einem Teil aus den niederenergetischen Teilen von Turbiditen und zum anderen Teil aus dem lagunären Bereich stammen dürften. Die Tentaculiten schließlich repräsentieren die Fauna des Beckens, in dem die Sedimentation erfolgte.

Der Beisinghäuser Kalk erweist sich durch seine sedimentologischen Merkmale (siehe Kap. 3.3.2. und 4.2.1.) als typischer Vertreter einer Art von Kalkturbiditen, für die MEISCHNER (1964) den Namen „allodapische Kalke“ vorschlug. Kalkturbidite besitzen durch ihre ausgeprägte Bankung und ihre weite Verbreitung (z. B. im Paläozoikum des Rheinischen Schiefergebirges) potentiell große Bedeutung als Naturbausteine. Abhängig von der paläogeographischen Position ändern sich aber ihre Gesteinseigenschaften; insbesondere kommt es mit zunehmender Entfernung vom Liefergebiet zu folgenden Entwicklungen:

- 1) Die Dicke der Kalkbänke nimmt ab (MEISCHNER 1964: 159-160, 163-164; FLÜGEL 1982: 515) - bei devonischen Riffschutt-Turbiditen von (durchschnittlich) 30 cm Dicke auf 2-3 cm Dicke (EDER et al. 1983: 99-101).
- 2) Der Anteil der tonigen Zwischenlagen (= pelagische Normalsedimentation) nimmt zu (MEISCHNER 1964: 163) - bei devonischen Riffschutt-Turbiditen von 5 % auf 70 % der gesamten Schichtmächtigkeit (EDER et al. 1983: 99-101).
- 3) Die maximale Korngröße der Turbidite nimmt ab (MEISCHNER 1964: 159-160, 164; FLÜGEL 1982: 515) - bei devonischen Riffschutt-Turbiditen von ca. 2 mm auf < 1 mm maximale Korngröße (EDER et al. 1983: 99-101).
- 4) Innerhalb eines Turbidites nimmt der Anteil der oberen Bankteile - die feinkörnig, laminiert und relativ tonreich sind (MEISCHNER 1964) - an der gesamten Bank zu auf Kosten der grobkörnigen basalen Teile (MEISCHNER 1964: 163-164; FLÜGEL 1982: 515).
- 5) In den Detrituskalken nimmt die mikritische Matrix zu (FLÜGEL 1982: 515).

Unter Zugrundelegung dieser Trends ist der Beisinghäuser Kalk der untersuchten Steinbrüche bei Beisinghausen (bzw. Reiste) und des Probenkollektivs P als Schichtenfolge aus ziemlich proximalen Turbiditen zu werten, die nicht weit vom Detritus liefernden Massenkalk-Riff sedimentierten. Zu dieser Ansicht kommt auch MEISCHNER (1964: 163, 180).

Eine Abfolge ziemlich proximaler Kalkturbidite ist schon aufgrund der Punkte 1) und 2) erheblich besser zur Naturbaustein-Gewinnung geeignet als eine riffern (= distal) entstandene Kalkturbidit-Folge, da bei den distalen Turbiditen die Gewinnung viel weniger wirtschaftlich ist (viel Abraum, wenig genügend dicke Bänke). Als nächstes muß die Verwitterungsbeständigkeit berücksichtigt werden. Dazu muß man sich bewußt machen, daß in einer Kalkturbidit-Bank vom Typ der „allodapischen Kalke“ von unten nach oben die Wasserturbulenz zum Zeitpunkt der Sedimentation abnimmt (vergleiche z. B.: MEISCHNER 1964; GAUGLITZ 1967: 40-51; FLÜGEL 1982: 509-513; EINSELE 1991; EBERLI 1991: 342-344) und deshalb Gesteine des Mikrofaziestyps 11 die Basis einer Bank bilden (wenn sie überhaupt entwickelt sind), worauf der Mikrofaziestyp 12 folgt. Die Mikrofaziestypen 13 und 14 sind den oberen Bankteilen zuzuordnen. Da meine Untersuchungen ergeben, daß die Mikrofaziestypen 11 und 12 eine größere Verwitterungsbeständigkeit als der Mikrofaziestyp 14 haben, sind besonders verwitterungsbeständige Kalksteine innerhalb eines Turbidites im basalen Bankteil des proximalen Bereiches zu suchen. Dieser Teil ist bei der größten Wasserturbulenz sedimentiert worden. Aber nicht nur von unten nach oben (= von Mikrofaziestyp 11 zu Mikrofaziestyp 14) nimmt die Wasserturbulenz ab, sondern auch von proximal nach distal. Daraus resultieren die in den Punkten 3) bis

5) aufgelisteten Trends (Abnahme der Korngröße, Zunahme des Mikrit-Gehaltes, Zunahme des Ton-Gehaltes, Verstärkung der Lamination), die durchgängig von Nachteil für die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen sind, wie die vorherigen Kapitel zeigen.

Neben dem sedimentären Environment muß man beim Probenkollektiv P aus dem Beisinghäuser Kalk noch die Diagenese berücksichtigen; denn im Gegensatz zu den anderen Probenkollektiven aus der Trias des Deckgebirges ist dieser Kalkstein im Karbon in die variszische Orogenese einbezogen worden und hat eine intensive Diagenese erlitten. Ob diese Diagenese insgesamt der Verwitterungsbeständigkeit des Kalksteins förderlich oder abträglich war, läßt sich nicht so pauschal sagen. Einer negativen Wertung - mit dem Hinweis auf die großen Schäden an der Kirche St. Pankratius (Reiste) nach relativ kurzer Expositionsdauer - kann man entgegenhalten, daß die Kirche in Helpup (Probenkollektiv E, Oberer Muschelkalk) nach noch kürzerer Expositionsdauer vergleichbare Schäden zeigte, während das ebenfalls dem Oberen Muschelkalk entstammende Probenkollektiv S (Burg Sparrenberg) einen viel größeren Expositionszeitraum überdauert hat. Hier spielen wohl spezifische Besonderheiten (bzw. Mängel) des Bauwerks eine Rolle.

Feststellen läßt sich allerdings, daß durch die Diagenese der Einfluß des sedimentären Environments auf die Verwitterungsbeständigkeit verringert wird. Zu erwähnen sind insbesondere folgende Prozesse:

- 1) Reduktion der Porosität durch Zementation und Kompaktion. Dadurch werden die anfangs großen Unterschiede in den Porositätseigenschaften immer kleiner.
- 2) Verringerung der Unterschiede zwischen Mikrit und Sparit durch a) Vergrößerung der Mikrit-Kristalle durch Rekristallisation oder Dolomitisierung und/oder b) Kornverkleinerung des Sparitzementes.
- 3) Verringerung des Anteils quellfähiger Tonminerale an der Gesamtheit der Tonminerale [siehe HELING (1988: 209-211) und Kap. 4.6.1.]. Dadurch verlieren sie an Bedeutung für die Verwitterungsbeständigkeit.

Alle drei Prozesse haben auf den Beisinghäuser Kalk eingewirkt und dazu geführt, daß das Probenkollektiv P nicht so klare Zusammenhänge zwischen den Mikrofaziestypen, bestimmten untersuchten Gesteinsparametern und dem Verwitterungszustand (bzw. der Verwitterungsbeständigkeit) zeigt.

6.2. Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks

Dank mehrerer grundlegender moderner Arbeiten - erwähnt seien hier besonders STEIN (1968), GROETZNER (1984: 156-164), LANGER (1989), THIELE (1990) und ROSENFELD & THIELE (1992) - kann der Untere Muschelkalk des Osnabrücker Raums als gut erforscht gelten. Zur Zeit des Unteren Muschelkalks befand sich das Germanische Becken - ein ausgedehntes Flachmeer, das hauptsächlich durch schmale Meerenngen in Süd-Polen Verbindung zur Tethys hatte - zwischen 15° und 20° nördlicher Breite in einem ganzjährig ariden Gebiet (LUKAS 1992: 85).

Bedeutsam für die fazielle Entwicklung des Muschelkalks ist, daß der Osnabrücker Raum im Bereich der Rheinischen (Hunte-) Schwelle lag, die sich schon im Buntsandstein deutlich bemerkbar machte (siehe z. B.: ROSENFELD 1978). Dank der Untersuchungen von THIELE (1990: 84-99) und ROSENFELD & THIELE (1992: 506-509), die ihre Umgrenzung während der verschiedenen Abschnitte des Unteren Muschelkalks sehr gut herausarbeiten, zeigt sich, daß Osnabrück durchgängig im zentralen Bereich der Rheinischen (Hunte-) Schwelle lag. Diese Schwellenposition schlägt sich in einer Mächtigkeitsreduktion der Schichtenfolge und einer schillärmeren (d. h. energieärmeren) Sedimentation nieder (THIELE 1990: 84-99; ROSENFELD & THIELE 1992: 506-509). Auch von den beiden anderen modernen Autoren wird der Osnabrücker Raum im Unteren Muschelkalk in eine Randlage (GROETZNER 1984: 164), bzw. Schwellenposition (LANGER 1989: 28), gestellt, und beide Autoren weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, daß im Osnabrücker Raum die Gelbkalke (Mikrofaziestyp 10) sehr viel häufiger und mächtiger als in der (tieferen!) „Normalentwicklung“ des Unteren Muschelkalks entwickelt sind.

Der größte Teil der Gesamtmächtigkeit des Unteren Muschelkalks entfällt auf die Wellenkalk-Formation in der Definition von HAGDORN, HORN & SIMON (1993: 41-42), für die ein Aufbau aus einzelnen Zyklen sehr charakteristisch ist, der eine detaillierte Untergliederung erlaubt (siehe z. B.: STEIN 1968; SCHULZ 1972; NADJAFI 1979; LANGER 1989; THIELE 1990; HAGDORN, HORN & SIMON 1993; GÖTZ 1994). Darüberhinaus kann eine Analyse der Zyklen wichtige Rückschlüsse auf das sedimentäre Environment und die Bathymetrie der Wellenkalke und plattigen Kalke (Mikrofaziestypen 7-9) liefern, die zwar die Hauptmasse der Wellenkalk-Formation stellen, deren diesbezügliche Interpretation aber umstritten ist [siehe dazu Kap. 4.2.1., Mikrofaziestyp 7, und vergleiche z. B. die Ausführungen von SCHWARZ (1975: 11-12) (Deutung: Intertidal, z. T. sehr flaches Subtidal), LUKAS (1991: 137) (Deutung: Subtidal, fraglich auch Intertidal), SIMON, ENGESER & LEIBER (1992: 288) (Deutung: Bereich der Sturm-Wellenbasis) und SEILACHER (1993: 221) (Deu-

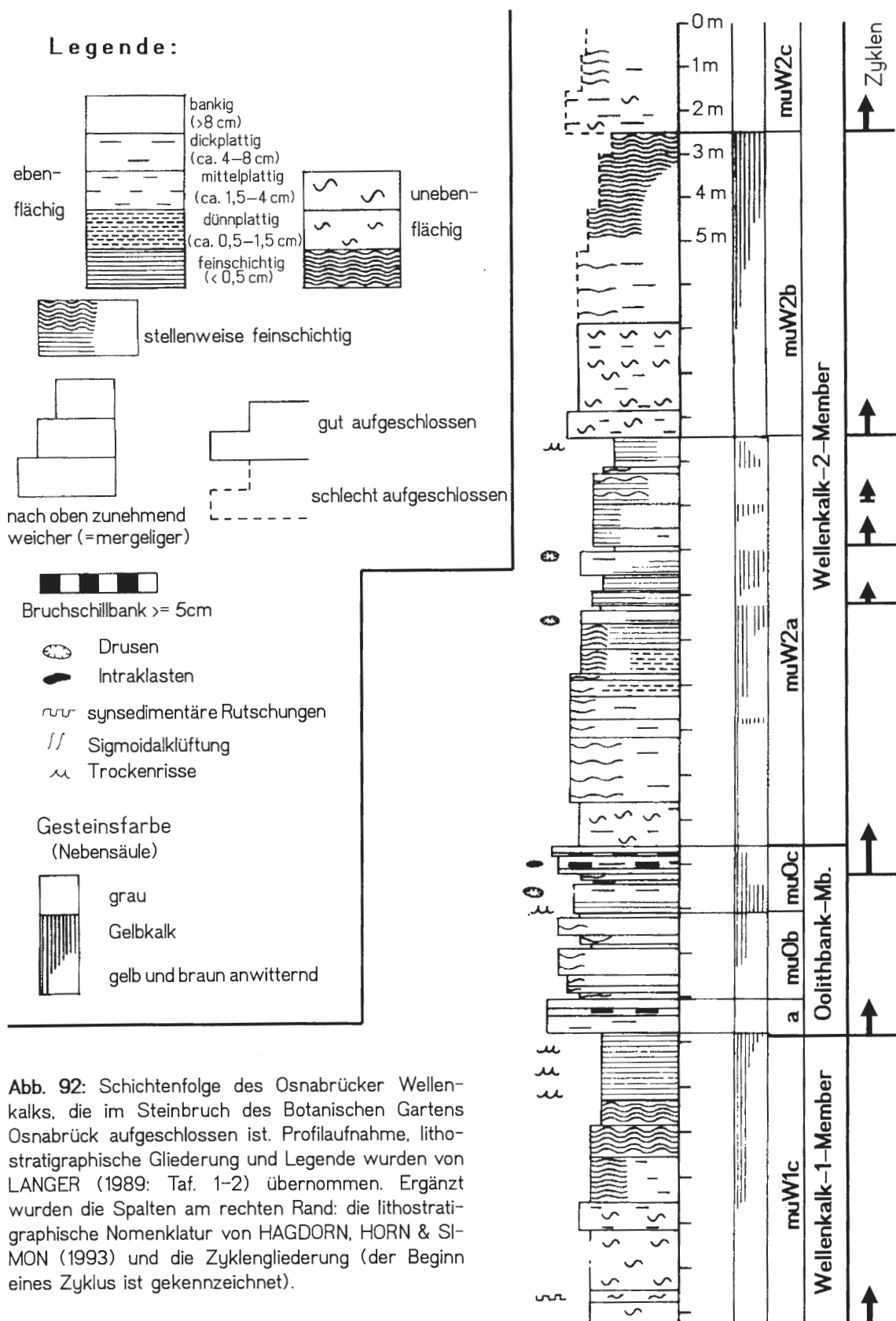


Abb. 92: Schichtenfolge des Osnabrücker Wellenkalks, die im Steinbruch des Botanischen Gartens Osnabrück aufgeschlossen ist. Profilaufnahme, lithostratigraphische Gliederung und Legende wurden von LANGER (1989: Taf. 1-2) übernommen. Ergänzt wurden die Spalten am rechten Rand: die lithostratigraphische Nomenklatur von HAGDORN, HORN & SIMON (1993) und die Zyklengliederung (der Beginn eines Zyklus ist gekennzeichnet).

tung: euxinische Beckenfazies) miteinander]. Aus diesem Grund soll im folgenden der Charakter der Zyklen im Osnabrücker Wellenkalk analysiert werden. Da der Osnabrücker Wellenkalk eine Schwellenausbildung der Wellenkalk-Formation darstellt, die in einigen Details - z. B. die vielfach auffällig ebenplattige Absonderung und gelbliche Verwitterungsfarbe des Osnabrücker Wellenkalks (GROETZNER 1984: 156; LANGER 1989: 10-15) - von der „Normalentwicklung“ abweicht, ist eine völlige Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebiete nicht gesichert.

Die Aufnahme des Steinbruchs im Botanischen Garten Osnabrück zeigt ebenso wie die Durchsicht der Literatur (FIEGE 1938: 143-150; SCHULZ 1972: 140; LANGER 1989: 27-28; THIELE 1990: 18, 80; GÖTZ 1994), daß folgende Abfolge vom Liegenden zum Hangenden im Unteren Muschelkalk immer wieder auftritt: Tempestit-Bänke (intraklastenreiche konglomeratische Kalke und/oder Mikrofaziestyp 5 und/oder Mikrofaziestyp 6) - Wellenkalke (Mikrofaziestypen 7-9) - Gelbkalke (Mikrofaziestyp 10). Diese Abfolge ist ein asymmetrischer Zyklus, denn der rückläufige Ast ist unterdrückt. Die im Steinbruch im Botanischen Garten Osnabrück aufgeschlossenen Zyklen lassen sich Abb. 92 entnehmen. Als Musterbeispiel für einen Zyklus kann jener Zyklus gelten, der im obersten Teil des Oolithbank-Members beginnt (siehe Abb. 92 und Kap. 4.2.3.).

FIEGE (1938: 150-152) interpretiert diesen Zyklus als Ausdruck epigenetisch bedingter Änderungen der Wassertiefe, wobei die „blauen kristallinen Kalke“ - die intraklastenreiche konglomeratische Kalke, Mikrofaziestyp 5, Mikrofaziestyp 6 und andere, oft ooidreiche, sparitische Kalke umfassen - in der größten Wassertiefe und die Gelbkalke in der geringsten Wassertiefe abgelagert wurden.

Demgegenüber ist SCHULZ (1972: 163-166) im Rahmen seiner Untersuchung des norddeutschen Unteren Muschelkalks der Ansicht, daß die verschiedenen Glieder des Zyklus in vergleichbarer Wassertiefe abgelagert wurden und daß im Verlaufe des Zyklus eine Entwicklung von vollmarin und stark bewegt zu übersalzen und kaum bewegt erfolgte. Zusammenfassend postuliert er, daß „die zyklischen Faziesänderungen wahrscheinlich weniger auf Unterschiede in der Wassertiefe als auf eine unterschiedliche Intensität des Wasseraustausches zwischen dem Germanischen Becken und dem offenen Meer durch die Oberschlesische Pforte zurückzuführen“ seien (SCHULZ 1972: 166). Diese Ansicht wird von THIELE (1990: 104) übernommen.

Ähnliche Zyklen im Unteren Muschelkalk Süddeutschlands erklärt KLOTZ (1990: 1366) „als immerwährende Entwicklung eines wenig differenzierten subtidalen Karbonatschlamm-Milieus hin zu einem differenzierten biogen-sedimentären Karbonatfällungssystem (z. B. Karbonatrampe)“. Dieses von KLOTZ (1992: 79-90) ausführlich dargestellte Modell postuliert folgende Abfolge der Mikrofaziestypen vom Liegenden zum Hangenden: Mikrofaziestypen 7 und 8 - Mikrofaziestyp 9 - Mikrofaziestyp 10 - Mikrofaziestypen 5 und 6.

Durch die in der vorliegenden Untersuchung erfolgte detaillierte Mikrofazies-Analyse mit Interpretation des sedimentären Environments kann als gesichert gelten, daß die Mikrofaziestypen 5 und 6 zwischen der Sturm-Wellenbasis und der Schönwetter-Wellenbasis abgelagert wurden und der Mikrofaziestyp 10 im hohen Intertidal und Supratidal entstand (siehe Kap. 4.2.1.). Diese deutliche Änderung der Bathymetrie läßt sich mit den Modellen von SCHULZ (1972) und KLOTZ (1990, 1992) nicht erklären. Stattdessen muß man FIEGE (1938) Recht geben: Es handelt es sich um Zyklen, bei denen sich die Wassertiefe ändert, wie sie vielfach aus flachmarinen Karbonaten beschrieben werden - es sind „shallowing-upward“-Zyklen, in denen im dokumentierten Ast die Wassertiefe abnimmt. „Shallowing-upward“-Sequenzen sind in flachmarinen Karbonaten weit verbreitet und können in vielfältiger Weise variieren (JAMES 1984); unter den von JAMES (1984) für den Bereich des niedrig-energetischen Intertidals unterschiedenen Typen besitzen die schlammige und die karbonatisch-evaporitische Sequenz (JAMES 1984: 218-222, Abb. 9, 15) große Ähnlichkeit zu den Abfolgen des Osnabrücker Wellenkalks. [In einigen Details abweichende „shallowing-upward“-Zyklen beschreiben DAHMER & HILBRECHT (1986: 523, Abb. 2) aus dem Unteren Muschelkalk Nordhessens. WILSON (1975: 281-309) stellt zahlreiche Beispiele für derartige Zyklen vor.] Obwohl sich GROETZNER (1984: 163-164) und LANGER (1989: 27-28) bei ihren Diskussionen der Zyklichkeit nicht von der Deutung bei SCHULZ (1972) distanzieren, fügt sich ihre Beobachtung, daß im Schwellenbereich des Osnabrücker Raums die Gelbkalke (Mikrofaziestyp 10) sehr viel häufiger und mächtiger als in der (tieferen!) „Normalentwicklung“ des Unteren Muschelkalks entwickelt sind, besser in das Konzept von FIEGE (1938) und mir als in die Modelle von SCHULZ (1972) und KLOTZ (1990, 1992).

Die an dieser Stelle erscheinende Frage, auf welchen Ursachen die die Zyklen bedingenden Meeresspiegelschwankungen beruhen, kann nur kurz angerissen werden: Da AIGNER & BACHMANN (1992, 1993) und RÖHL (1990a; 1993: 32-33) die im Oberen Muschelkalk beobachtbaren Zyklen auf eustatische Meeresspiegelschwankungen zurückführen, läßt sich vergleichbares auch für die Zyklen des Unteren Muschelkalks annehmen. ZIEGLER (1990: 78-79) diskutiert mehrere mögliche Ursachen für die kurzfristigen Meeresspiegelschwankungen in der Trias: 1) Flutung und (möglicherweise) Austrocknung von Becken im Bereich des zentralen und nördlichen Atlantiks; 2) durch tektonischen Streß verursachte Niedrig-Relief-Deformationen der Lithosphäre; 3) glazio-eustatische Meeresspiegelschwankungen durch polare Vereisungsphasen.

Nachdem der Charakter des Zyklus geklärt ist, lassen sich über die bathymetrische Aussage der Anfangs- und Endglieder und die im Zyklus beobachtete Abfolge die dazwischen liegenden Wellenkalke einstufen: Die Gesteine des Mikrofaziestyps 7 lassen sich ins Subtidal einordnen und die Mikrofaziestypen 8 und 9 entstanden im flachen Subtidal bis Intertidal (siehe Kap. 4.2.1., Mikrofaziestyp 7). Die Lagen aus detritischen Wackestones, die in den Mikrofaziestypen 7-9 auftreten, müssen aufgrund ihrer sedimentologischen Merkmale als Tempestite-Lagen gedeutet werden. Da sie aus kleineren Partikeln als die Mikrofaziestypen 5 und 6 bestehen, sind sie wahrscheinlich bei geringerer Wasserturbulenz als die Mikrofaziestypen 5 und 6 abgelagert worden. Dieser auf den ersten Blick irritierende Umstand, daß mit abnehmender Wassertiefe auch die Wasserturbulenz abnimmt, wurde schon von FIEGE (1938: 147) erwähnt. Er läßt sich mit dem von SCHWARZ (1985: 16-35) für den süddeutschen Oberen Muschelkalk entwickelten Modell erklären, das schon von THIELE (1990: 99-101) auf den norddeutschen Unteren Muschelkalk übertragen wurde. Auf dem von IRWIN (1965) vorgestellten Modell (vgl. z. B.: FLÜGEL 1978: 410-412; 1982: 536-542) aufbauend nimmt SCHWARZ (1985: 16-35) eine schwach geneigte Karbonatrampe an, die von unten nach oben in drei Bereiche differenziert ist: I) Becken (überwiegend Mergel), II) Barre (überwiegend bioklastische Kalke) und III) Lagune (überwiegend dichte Kalke). Vom Bereich II ausgehend nimmt in beide Richtungen (beckenwärts und küstenwärts) der Anteil an bioklastischen Kalken ab und an dichten (= mikritischen) Kalken zu. Wenn man die Mikrofaziestypen des Osnabrücker Wellenkalks darauf überträgt, kann man die Mikrofaziestypen 5 und 6 in den Grenzbe- reich zwischen den Bereichen II und III verorten und die Mikrofaziestypen 7-9 dem Bereich III zuordnen. Die auffällige Fossilarmut der Mikrofaziestypen 7-9 spricht für extreme Bedingungen - zeitweiliges Trockenfallen (Intertidal-Bereich) und/oder hypersaline Verhältnisse - und unterstützt so die Einordnung in einen lagunären Bereich. Bei Anwendung des Rampenmodells von SCHWARZ (1985: 16-35) wären die Zyklen im Osnabrücker Wellenkalk das Ergebnis einer auf Meeresspiegeländerungen beruhenden Wanderung der Fazieszonen und der Mikrofaziestyp 10 stellte den küstennächsten Teil der zyklischen Abfolge dar. Als Argument gegen die Übertragung des Modells von SCHWARZ (1985) läßt sich darauf hinweisen, daß THIELE (1990: 102) der Meinung ist, daß die Wellenkalk-Member Zeiten eines Rückgangs der Barrensedimentation sind. Es sollte aber auch ohne Existenz einer Barre möglich sein, sinnvolle sedimentologische Modelle für den Osnabrücker Wellenkalk zu entwickeln. So beobachtete z. B. MAY (1987: 70-71; 1988: 186) im lagunären Massenkalk (Mitteldevon) des Briloner Riffs, daß mit zunehmender Wassertiefe auch die Wasserbewegung zunahm, obwohl vermutlich kein echter Riffkern oder eine andere Barriere vorhanden war, und erklärte dieses Phäno- men damit, daß infolge der großräumigen Zunahme der Wassertiefe Wasserströmungen und Wellenbewe- gung weiter in den lagunären Bereich vorstoßen konnten. GALLI (1993: 24-27) gibt Beispiele dafür, daß unter bestimmten Bedingungen (transgressive, retrogradationale Trends) im Bereich der flachen Rampe in Tempestiten die Korngröße und Bankdicke zum Land hin abnimmt - also entgegengesetzt zur von AIGNER (1982, 1984, 1985) und anderen Autoren beobachteten Richtung. Welches Faziesmodell die Verhältnisse im Osnabrücker Wellenkalk am besten erklärt, müssen zukünftige Untersuchungen zeigen.

Leicht zu erkennen sind die Zusammenhänge zwischen sedimentärem Environment und Verwitterungs- beständigkeit im Osnabrücker Wellenkalk: Die Mikrofaziestypen 5 und 6, die als Tempestite bei ziemlich hoher Wasserturbulenz sedimentierten, sind erheblich verwitterungsbeständiger als die Mikrofaziestypen 7- 9, die in wesentlich stillerem Wasser abgelagert wurden. Die geringer entwickelte Feinschichtung und der geringere Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand in den Mikrofaziestypen 5 und 6, die die Verwite- rungsbeständigkeit positiv beeinflussen, beruhen direkt auf der im Vergleich zu den Mikrofaziestypen 7-9 höheren Wasserturbulenz. Für die Porositätsparameter gibt es mittelbare Zusammenhänge. Damit zeigen sich Parallelen zum ganz anders entstandenen Beisinghäuser Kalk: Je weiter man sich vom flachmarinen hochenergetischen Subtidal in ruhigeres Wasser bewegt, desto geringer wird tendenziell die Verwitterungs- beständigkeit der Kalksteine. Im Osnabrücker Wellenkalk wird flachmarines, relativ hochenergetisches Sub- tidal von den Mikrofaziestypen 5 und 6 repräsentiert. In Annäherung an die Küste folgen die im niederener- getischen flachen Sub- und Intertidal sedimentierten, lagunären Charakter zeigenden Mikrofaziestypen 7-9, und am küstennächsten (somit am weitesten vom flachmarinen Subtidal entfernt) entstanden im hohen Inter- bis Supratidal die Gelbkalke des Mikrofaziestyps 10. Der Mikrofaziestyp 10 setzt mit seiner geringen Verwitterungsbeständigkeit den aufgezeigten Trend fort, obwohl er weder durch eine besonders stark aus- geprägte Feinschichtung noch durch einen großen Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand auffällt. Hier geben die ungünstigen Porositätsparameter den Ausschlag, die zu einem wesentlichen Teil auf der Dedolo- mitisierung des Gesteins beruhen dürften.

Bedauerlicherweise sind die besonders verwitterungsbeständigen Mikrofaziestypen 5 und 6 auf zwei ge- ringmächtige Horizonte (muOa und muOc) im Oolithbank-Member beschränkt (siehe Kap. 3.2.3.).

6.3. Oberer Muschelkalk des Bielefelder Raums

Die Verhältnisse im Oberen Muschelkalk entsprechen in vieler Hinsicht weitgehend denen im Unteren Muschelkalk: Abgesehen davon, daß nun als weiterer Kontakt zur Tethys die „Burgundische Pforte“ an der Südwest-Ecke Deutschlands eine wichtige Rolle spielt (ZIEGLER 1990: 82), hat sich die Paläogeographie nicht nennenswert geändert. Obwohl die marine Fauna des Oberen Muschelkalks im Vergleich zum Unteren Muschelkalk erheblich reicher ist, hat das Germanische Becken seinen Randmeer-Charakter behalten; und auch die Gesteine des Oberen Muschelkalks zeigen einen zyklischen Aufbau (siehe z. B.: AIGNER: 1984, 1985; AIGNER & BACHMANN 1992, 1993; DUCHROW & GROETZNER 1984: 203-204; RÖHL 1988, 1990a, 1993). Allein mit der zyklischen Abfolge läßt sich allerdings nicht erklären, daß in Ost-Westfalen neben dem Trochitenkalk *sensu stricto* [tiefer Teil der Trochitenkalk-Formation im Sinne von HAGDORN, HORN & SIMON (1993: 44)] auch der in diesem Gebiet im Aussehen und der Verwendbarkeit als Baustein sehr ähnliche - und deshalb von verschiedenen Autoren (siehe z. B.: ROSENFELD 1982: 9; NOLTE 1982: 48-49; LUTHER 1982: 84-85; DUCHROW & GROETZNER 1984: 192; SCHWENKE 1993) als „Oberer Trochitenkalk“ bezeichnete - Terebratelkalk (oberster Teil der Trochitenkalk-Formation) sedimentiert wurde, denn der Terebratelkalk besitzt je nach geographischer Lage ein anderes stratigraphisches Alter (vgl. z. B.: ROSENFELD 1978: Abb. 4; DUCHROW & GROETZNER 1984: 186-187, 209-210; RÖHL 1993; SCHWENKE 1993). DUCHROW & GROETZNER (1984: 209-210) und SCHWENKE (1993: 222) erklären die Diachronie des „Oberen Trochitenkalks“ bzw. Terebratelkalks durch eine wandernde Spezialschwelle.

DUCHROW & GROETZNER (1984) liefern die modernste publizierte stratigraphisch-lithologische Bearbeitung des Oberen Muschelkalks im nordöstlichen Westfalen. Da LANGER (1989: 35-37) die Ergebnisse von DUCHROW & GROETZNER (1984) überprüfen und bestätigen konnte, wird hier ihre Stratigraphie zugrunde gelegt. Im Folgenden soll zuerst der Trochitenkalk *sensu stricto* diskutiert werden:

AIGNER (1985: 113-117) entwickelte für den Trochitenkalk des süddeutschen Oberen Muschelkalks das Konzept einer „crinoidal ramp“, dessen höchster Punkt - die Barre - aus ooidreichen Grainstones gebildet wird, an die sich sowohl lagunen- als auch beckenwärts Pack- bis Grainstones aus Crinoiden, Mollusken und Brachiopoden anschließen. Lagunenwärts folgen dolomitische Crinoidenkalke, während beckenwärts Brachiopoden-Packstones und - noch weiter beckenwärts - feinkörnige Packstones, Mudstones und Mergel dominieren. Für den Trochitenkalk des Hildesheimer Waldes entwickelte RÖHL (1986: 494-507) ein ähnlich strukturiertes Schwellen-Modell: Die Schwellenfazies besteht aus Oosparit bis Bio-Oosparit. Die Flankenfazies bauen Bruchschill- und Schillkalke (Trochiten häufig, Ooide selten) auf, die sich in eine höherenergetische Gruppe (Grain- bis Rudstones) und eine niederenergetische Gruppe (Wacke- bis Grainstones) differenzieren lassen (RÖHL 1986: 507). In der Lagune folgen Bio- und Dolomikrite, das Becken charakterisieren Schill-Tempestite.

Die im Probenkollektiv S gefundenen Mikrofaziestypen 1-4 lassen sich so in diese Modelle einordnen (vgl. Kap. 4.2.1.): In der geringsten Wassertiefe und bei der größten Wasserturbulenz (oberhalb der Schönwetter-Wellenbasis) wurde der Mikrofaziestyp 2 sedimentiert, in etwas tieferem, weniger bewegtem Wasser (zwischen Schönwetter- und Sturm-Wellenbasis) entstand der Mikrofaziestyp 1 und noch tiefer (an der Sturm-Wellenbasis) wurde der Mikrofaziestyp 4 abgelagert. Obwohl die genaue Einstufung des Mikrofaziestyps 3 noch zu diskutieren ist, läßt sich sagen, daß er nicht unter größerer Wasserbewegung als der Mikrofaziestyp 2 und nicht unter geringerer als der Mikrofaziestyp 1 gebildet wurde. Bei keinem Dünnschliff des Probenkollektivs S handelt es sich um ausgesprochen ooidreiche Kalke oder gar Oolithe, so daß die Barre des Modells von AIGNER (1985) oder die Schwelle des Modells von RÖHL (1986) nicht repräsentiert ist. Vielmehr sind die Mikrofaziestypen 1-3 typische Vertreter der Flankenfazies, und der Mikrofaziestyp 4 gehört in die der Flanke vorgelagerte Fazies stilleren Wassers. Es bleibt nur noch die Frage, ob es sich um die beckenseitige oder die lagunenseitige Flanke handelt. Da die Mikrofaziestypen beider Flanken einander ähnlich sind und nicht die zur Beantwortung dieser Frage notwendigen umfangreichen Aufschlußaufnahmen durchgeführt werden konnten, läßt sich keine sichere Entscheidung fällen. Trotzdem ist die lagunenseitige Flanke wahrscheinlicher, denn es spricht folgendes dafür:

- Im Probenkollektiv S fanden sich keine Tempestite.
- Kalke, die den z. T. dolomitisierten Crinoiden-Packstones des Mikrofaziestyps 1 vergleichbar sind, fand AIGNER (1985) im lagunären Bereich der „crinoidal ramp“.
- Brachiopoden zeigen im Vergleich zu Muscheln eine relativ geringe Häufigkeit.
- „Algenschläuche“ sind auffällig häufig.

Bei der Interpretation der Ablagerungsbedingungen des Mikrofaziestyps 3 muß berücksichtigt werden, daß sich dieser Mikrofaziestyp nur durch seine mikritische Matrix vom Mikrofaziestyp 2 unterscheidet. Obwohl das Auftreten einer mikritischen Matrix im allgemeinen auf geringe Wasserenergie verweist, spricht die

wahrscheinlich sedimentbindende Wirkung der Algenschläuche für eine dem Mikrofaziestyp 2 völlig vergleichbare Wasserturbulenz und Bathymetrie. Diese Ansicht wird durch die fließenden Übergänge zwischen den Mikrofaziestypen 2 und 3 sowie den stellenweise nachweisbaren Aufbau des Mikrites aus Peloiden unterstützt.

Ein dem Trochitenkalk sensu stricto vergleichbares sedimentologisches Modell läßt sich auch für den Terebratelkalk entwickeln - die Parallelen in den Mikrofaziestypen sind auffällig. Der Mikrofaziestyp 15 entspricht dem Mikrofaziestyp 2 und der Mikrofaziestyp 16 dem Mikrofaziestyp 3. Analoga zum Mikrofaziestyp 17 sind im Mikrofaziestyp 1 und im Mikrofaziestyp 4 zu suchen. Die dichter gepackten *Coenothyris*-Schille entsprechen dem Mikrofaziestyp 1 - was sich mit den Beobachtungen von DUCHROW & GROETZNER (1984: 195) deckt -, während sich die bioturbate Varietät des Mikrofaziestyps 17 zum Vergleich mit dem Mikrofaziestyp 4 anbietet. Die Oosparite des Mikrofaziestyps 15 bilden den Kern und die Oomikrite des Mikrofaziestyps 16 die Flanke der Barre im „shelly/oolithic ramp“-Konzept von AIGNER (1985: 117-120) bzw. der Schwelle im Modell von RÖHL (1986: 494-507). Es bleibt nur noch die Frage, ob der Mikrofaziestyp 17 auf der beckenseitigen oder auf der lagunenseitigen Flanke sedimentierte. Der Mangel an Aufschlüssen im untersuchten Gebiet erlaubt keine sichere Entscheidung, aber die auffällig große Häufigkeit von *Coenothyris*-Schalen spricht für die beckenseitige Flanke.

Eine Auswertung der Zusammenhänge zwischen sedimentärem Environment und Verwitterungsbeständigkeit ist nur für den Trochitenkalk sensu stricto möglich, da beim Terebratelkalk des Probenkollektivs E infolge des antagonistischen Wirkens von Porositätsparametern und mikrofaziellen Eigenschaften keine Korrelation zwischen Verwitterungsbeständigkeit und Mikrofaziestyp erkennbar war. Die Betrachtung der Verwitterungsbeständigkeit zeigt, daß der Mikrofaziestyp 2, der als einziger Mikrofaziestyp aus dem Trochitenkalk sensu stricto sparitisch zementiert ist, verwitterungsbeständiger als die anderen, mikritreicheren Mikrofaziestypen ist. Im Vergleich zu den Mikrofaziestypen 1 und 4 läßt sich deren höherer Mikrit-Gehalt leicht auf die Sedimentation in stillerem, tieferem Wasser zurückführen. Beim Mikrofaziestyp 3 ist das nicht so einfach, denn hier muß man neben der Wasserturbulenz noch mit der sedimentfangenden und -bindenden Wirkung der „Algenschläuche“ rechnen. Dadurch stellen diese Organismen einen Störfaktor bei der Ermittlung von Trends in der Verwitterungsbeständigkeit des Trochitenkalks dar. Zwar wurden die „Algenschläuche“ bis jetzt nur von SKUPIN (1970: 80, Taf. 4 Fig. 1-2), BACHMANN (1973: 37-38) und HÜSSNER (1993: 267-268, Abb. 4.7) beschrieben; da ich sie aber im Rahmen meiner Untersuchungen an verschiedenen Fundorten und in unterschiedlichen Teilen des Oberen Muschelkalks stellenweise gehäuft beobachtet konnte, ist von einer weiten Verbreitung der „Algenschläuche“ auszugehen - vermutlich wurden sie bis jetzt übersehen. Da die „Algenschläuche“ nur in bestimmten Mikrofaziestypen (gehäuft) auftreten, stellten sie wahrscheinlich sehr spezielle ökologische Ansprüche. Verbesserte Kenntnis dieser ökologischen Ansprüche könnte dann auch für die Suche nach besonders verwitterungsbeständigen Kalksteinen relevant werden.

6.4. Allgemeine Trends

Die synoptische Schau der in den vorherigen Unterkapiteln herausgearbeiteten Zusammenhänge zwischen den Entstehungsbedingungen und der Verwitterungsbeständigkeit bestimmter Kalksteine zeigt: Tendenziell sind Kalksteine, die in $\pm$ turbulentem (und damit $\pm$ flachem) Meereswasser entstanden, verwitterungsbeständiger als solche aus anderen sedimentären Environments. Das gilt gleichermaßen für Turbidite (Probenkollektiv P; Beisinghäuser Kalk) und Tempestite (Probenkollektiv K, Osnabrücker Wellenkalk) wie für „normale“ Karbonatrampen-Sedimente (Probenkollektiv S, Trochitenkalk). Diese Abnahme der Verwitterungsbeständigkeit läßt sich sowohl in beckenwärtiger Richtung als auch in lagunenwärtiger Richtung konstatieren, da in beiden Richtungen die Wasserenergie abnimmt. Die Abnahme der Wasserenergie schlägt sich in folgenden sedimentären Merkmalen nieder, die der Verwitterungsbeständigkeit abträglich sind:

- Zunahme des Mikrit-Anteils.
- Ersetzen sparitischen Zementes durch mikritische Matrix.
- Häufigere und bessere Entwicklung von Feinschichtung (Lamination).
- Zunahme des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand. Insbesondere die Tonminerale nehmen an Bedeutung zu.

Sollte sich dieser Trend für Kalksteine verallgemeinern lassen, könnte das wichtige Konsequenzen für die Suche nach Lagerstätten verwitterungsbeständiger Kalksteine haben. Es sind aber folgende Probleme zu berücksichtigen:

- Sedimentfangende oder -bindende Organismen können die Sedimentationsbedingungen sehr beeinflussen.
- Fortschreitende Diagenese vermindert den Einfluß des sedimentären Environments auf die Verwitterungsbeständigkeit.
- Es konnten keine Süßwasserkalke untersucht werden.

7. Ursachen und Entwicklung der beobachteten Schäden an den Bausteinen

Obwohl die Frage nach den Ursachen und der Entwicklung der an den untersuchten Bausteinen beobachteten Schäden nicht im Mittelpunkt des vorgestellten Forschungsprojektes stand, soll auch sie diskutiert werden, denn zum einen liefern die Untersuchungsergebnisse dazu wichtige Informationen und zum anderen sollte die Entstehung und Entwicklung der aufgetretenen Schäden bei der Restaurierung berücksichtigt werden. Da es zu diesem Fragenkomplex zahlreiche Publikationen gibt, soll im ersten Unterkapitel eine knappe Diskussion der einschlägigen Literatur erfolgen, während im zweiten Unterkapitel die eigenen Beobachtungen dargestellt und interpretiert werden. Als bewußter Vorgriff auf das Folgende sei darauf hingewiesen, daß die eigenen Beobachtungen gravierend von der in der Literaturmehrheit dokumentierten Ansicht abweichen. Zu einem nicht unwichtigen Teil dürfte dieser Unterschied im unterschiedlichen Ansatzpunkt der Forschungen begründet liegen, d. h. in vielen Fällen implizierte die Fragestellung die Antwort.

7.1. Literaturdiskussion

Wie der Verfasser selbst immer wieder beobachten konnte, äußert ein unvoreingenommen über die potentiellen Verwitterungsprozesse und -erscheinungen an Kalkstein-Naturbausteinen reflektierender Naturwissenschaftler normalerweise die Erwartung, daß der relevante Prozeß chemische Lösung und die hauptsächlichliche Schädigung eine Abtragung/Zerstörung der Gesteinsoberfläche sei, da Kalzium- und Magnesiumkarbonat leicht durch Säuren angreifbar und ziemlich leicht wasserlöslich sind. Dementsprechend wird der Luftverschmutzung (Stichwort: „Saurer Regen“) große Bedeutung für den Steinzerfall zugebilligt. Auf der so umrissenen Arbeitshypothese beruhen die meisten Arbeiten über die Verwitterungsprozesse und -erscheinungen an Kalkstein-Naturbausteinen. Dabei lassen sich grob zwei Richtungen gegeneinander abgrenzen: Eine experimentell angelegte Richtung und eine deskriptiv die Schäden und Veränderungen an der Gesteinsoberfläche (bzw. in Oberflächennähe) erfassende Richtung. Der experimentell angelegten Richtung lassen sich folgende Arbeitsmethodiken zuordnen:

- Freilandversuche zur Simulation und Analyse der Verwitterungsprozesse an der Oberfläche, wie sie HONEYBORNE & HARRIS (1958), CRNKOVIC & KRTOLICA (1976: 189), BUTLIN et al. (1985, 1988, 1992), REDDY et al. (1985), WEBER (1985: 531-532), GERARD (1985), ZALLMANZIG (1986), JAYNES & COOKE (1987), SHERWOOD & REDDY (1988), VLEUGELS et al. (1988), ROSS, MCGEE & ROSS (1989), BLASCHKE (1988; 1989: 27-28), LIPFERT (1989: 156-161), SIMPER (1991: 127-128), SNETHLAGE & SIMON (1992: 24-26), FURLAN & GIRARDET (1992), WHALLEY et al. (1992), BLASCHKE & JULING (1992: 298-301), BRÜGGERHOFF & MIRWALD (1992) und MIRWALD & BRÜGGERHOFF (1995) beschreiben. Besonders erwähnt seien zwei nationale Projekte in Industrieländern, die großangelegte Immissionsraten- und Wirkungserhebungen an ausgewählten Natursteinen und Orten durchführten:
 - a) In der Bundesrepublik Deutschland (1978-1979) und in Europa (1981-1983) wurden am Zollern-Institut (Bochum) (vom Umweltbundesamt beauftragte) Wirkungserhebungen am Baumberger Kalksandstein und am Krensheimer Muschelkalk durchgeführt. Näheres läßt sich MIRWALD & ZALLMANZIG et al. (1987: 288, 291) und ZALLMANZIG (1986) entnehmen. Auf diesen Ergebnissen aufbauend begann 1987 ein weiteres Freiland-Expositionsprogramm (BRÜGGERHOFF & MIRWALD 1991, 1992).
 - b) In den USA erfolgten im Rahmen des „National Acid Precipitation Assessment Program“ Erhebungen an je einem Typ Kalkstein und Marmor. Details liefern REDDY et al. (1985), SHERWOOD & REDDY (1988) und ROSS, MCGEE & ROSS (1989).
 Zur Zeit werden weitere Projekte auf europäischer Ebene durchgeführt (SNETHLAGE & SIMON 1992; HAAGENRUD & DAHLIN 1994).
- Laborversuche zur Simulation der Verwitterungsprozesse an der Oberfläche mittels künstlicher Begasung und/oder künstlich geförderttem Mikroben-Wachstum. SCHAFFER (1932: 29, 36, Abb. 21-22), ROSSI-MANARESI & GHEZZO (1978), NIESEL (1979: 108-112), KRAUS (1985: 34-35), WEBER (1985: 527-531), MENTLER et al. (1985: 222-226), VAN GEMERT, ULRIX & VIAENE (1988), SIKIOTIS et al.

(1992), LEWRY, BIGLAND & BUTLIN (1992), GAURI, TAMBE & CANER-SALTIK (1992: 55-59) und URZI, KRUMBEIN & PERNICE (1992) wandten derartige Verfahren an.

- Messung der Löslichkeit von Karbonatgesteinen in sauren Lösungen unter Laborbedingungen, wie z. B. von AIRES-BARROS (1977), AIRES-BARROS, MAURÍCIO & FIGUEIREDO (1991) und DERMENTZOPOULOS et al. (1988: 622-627) betrieben.

Die deskriptiv die Schäden und Veränderungen an der Gesteinsoberfläche (bzw. in Oberflächennähe) erfassende Richtung läßt sich in folgende Untersuchungsgebiete untergliedern:

- Messung der Geschwindigkeit der Abtragung (bzw. Lösung) der Kalkstein-Oberfläche unter natürlichen Bedingungen. Eine Zusammenstellung von Daten gibt LIPFERT (1989: 153-156). Moderne Daten beruhen in einzelnen Fällen auf der Untersuchung von natürlichen Kalkstein-Vorkommen (z. B. SWEETING 1966). Häufiger erfolgt die Messung der Geschwindigkeit der Oberflächenabtragung an Grabsteinen; als Beispiele können die Arbeiten von KUPPER & PISSART (1974), KUPPER (1975), DRAGOVICH (1986, 1987, 1991), FEDDEMA & MEIERDING (1987), ATTEWELL & TAYLOR (1988: 748-752), LUKAS (1990: 96-106, 120-123) und SIMPER (1991: 135-139, 149-158) gelten.
- Beschreibung und Interpretation der auf der Gesteinsoberfläche erkennbaren Schädigungen, Verschmutzungen und Krustenbildungen, wie z. B. in folgenden Publikationen: SCHAFFER (1932: 24-33), KIESLINGER (1932, 1949), HONEYBORNE & HARRIS (1958), HERRERO (1967), WINKLER (1973: 140-145), REICHEL (1975), PELLERIN (1976), CRNKOVIC & KRTOLICA (1976), LAZZARINI & BEGOLLI (1976), ROSSI-MANARESI & GHEZZO (1978), LEWIN & CHAROLA (1978), NIESEL (1979, 1986a), EFES (1980), KLEMM (1980), LEWIN & CHAROLA (1981), BLANC et al. (1981), CUTTANO et al. (1981), ZEZZA (1981), GALE & WEISS (1982), CAMUFFO et al. (1982), ESBERT et al. (1981, 1983, 1988), AMOROSO & FASSINA (1983), GRIMM (1983; 1984b: 541-547; 1986b), SNETHLAGE (1984), FASSINA & CHERIDO (1985), KRAUS (1985), NIJS (1985), MENTLER et al. (1985: 216-220; 1986), GORETZKI, FÜTING & KÖHLER (1987), GORETZKI, SEIDEL & STEINER (1987), KRUMBEIN & SCHÖNBORN-KRUMBEIN (1987a, b), MIRWALD & ZALLMANZIG et al. (1987), WINKLER (1987), GORALCZYK et al. (1988), AIRES-BARROS & ALVES (1988), ARNOULD (1988), BORTOLASO et al. (1988), BUTLIN et al. (1988), DERMENTZOPOULOS et al. (1988), FASSINA (1988a, b, 1992), HAMMECKER & JEANNETTE (1988), JABLOŃSKA-SZYSZKO & RUDNICKA (1988), KERTÉSZ (1988), KÖHLER (1988), NIJS et al. (1988), ROEKENS et al. (1988), THEOULAKIS & MOROPOULOU (1988), WINKLER (1988), DOE (1989), DUTTLINGER & KNÖFEL (1989), KATZSCHMANN (1989), AIRES-BARROS et al. (1990), LUKAS (1990: 93-128, 134-203), MÜLLER & SCHWAIGHOFER et al. (1990), SCHÄFER (1990), CHRISTARAS (1991), LUKAS (1991), SCHWARZ (1986: 153-165, 181-199), DÜPPENBECKER & FITZNER (1991), KRUMBEIN & BRAAMS et al. (1991), SIMPER (1991: 129-155), BÖKE et al. (1992), CANEVA et al. (1992), GAURI, TAMBE & CANER-SALTIK (1992: 60-62), ALESSANDRINI et al. (1992), MARAVELAKI et al. (1992), SHERWOOD & DOLSKE (1992), McGEE (1992), SPADEA (1992), FELIX & MARAVELAKI (1992) und SEBASTIAN PARDO et al. (1992).

Demgegenüber ist die Zahl der Arbeiten, die der Schädigung des Gesteinszusammenhaltes und der Entwicklung von Rissen Aufmerksamkeit widmet, sehr klein:

- DE QUERVAIN (1945: 19-21, 42-43; 1967: 191-192), KNÖFEL (1980: 102) und WIHR (1986: 56-58) beschreiben den rißbedingten Bröckelzerfall von (überwiegend feinkristallinen) Kalksteinen.
- HOSEK & SKUPIN (1978) beschreiben an Pläner-Kalkstein aus Prag - neben Oberflächen-Schäden, die sie auf aggressive Stoffe in der Atmosphäre zurückführen - eine Schädigung des Gesteinszusammenhaltes durch Risse.
- HUDEC (1978a) beschreibt Kalksteine mit intensiver Rißbildung und Bröckelzerfall aus Gebieten ohne Frost-Einwirkung und führt diese Schäden auf Befeuchtungs-Austrocknungs-Zyklen zurück (HUDEC 1978a, 1980).
- MARSCHNER (in KLEMM 1980: 137) weist in einem kurzen Diskussionsbeitrag darauf hin, daß „gravierende Kalksteinschäden ... in Form tiefreichender Rißbildung“ bestehen.
- BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988a, b) beschreiben die starke Schädigung eines mikritischen Kalksteins durch zahlreiche und große Risse.
- LEWIN & CHAROLA (1978: 696-699) beobachteten im Rasterelektronenmikroskop die Entstehung makroskopischer Risse mittels der Aufweitung und Ausdehnung kleiner Risse durch die Wiederausscheidung gelösten Kalziumkarbonates.
- WINKLER (1981) beschreibt von Granit und Marmor tiefreichende Risse, die er auf die Entspannung tektonisch bedingten Stresses infolge von Verwitterungsprozessen (Wärme, Feuchtigkeits-Quellen und chemische Auflösung) zurückführt.
- ROSSI-MANARESI, TUCCI & GRILLINI (1992: 569-570) beschreiben aus mikritischen Kalksteinen in Ferrara den Gesteinszusammenhalt zerstörende Risse.

In logischer Konsequenz wird in der Mehrzahl der Arbeiten der chemischen Verwitterung bei Kalksteinen eine größere Rolle als der Frostsprengung oder anderen Arten der physikalischen Verwitterung zugerechnet.

In den vorliegenden Arbeiten, die sich mit der Schädigung (bzw. Verwitterung) von Kalkstein-Naturbausteinen beschäftigen und eine Hauptursache dafür benennen, werden die dort beschriebenen Schäden (bzw. Verwitterungserscheinungen) hauptsächlich zurückgeführt auf:

- chemische Lösung und/oder Luftverschmutzung von SCHAFFER (1932), KIESLINGER (1932: 255; 1949: 352-358), HERRERO (1967), WINKLER (1973: 137-145), KUPPER & PISSART (1974), KUPPER (1975), LAZZARINI & BEGOLLI (1976), ROSSI-MANARESÍ & GHEZZO (1978), LEWIN & CHAROLA (1978: 696-699), NIESEL (1979: 85), EFES (1980), KLEMM (1980), ZEZZA (1981), CAMUFFO et al. (1982), AMOROSO & FASSINA (1983), BUTLIN et al. (1985, 1992), FASSINA & CHERIDO (1985), KRAUS (1985), REDDY et al. (1985), WEBER (1985), ZALLMANZIG (1986), DRAGOVICH (1986, 1987, 1991), FEDDEMA & MEIERDING (1987), GORETZKI, FÜTING & KÖHLER (1987), JAYNES & COOKE (1987), MIRWALD & ZALLMANZIG et al. (1987), WINKLER (1987), GORALCZYK et al. (1988), AIRES-BARROS & ALVES (1988), BORTOLASO et al. (1988), BUTLIN et al. (1988), DERMENTZOPOULOS et al. (1988), FASSINA (1988a, b, 1992), NIJS et al. (1988), WINKLER (1988), ATTEWELL & TAYLOR (1988), ROEKENS et al. (1988), SHERWOOD & REDDY (1988), VLEUGELS et al. (1988), DOE (1989), LIPFERT (1989), ROSS, MCGEE & ROSS (1989), AIRES-BARROS et al. (1990), SCHÄFER (1990), AIRES-BARROS, MAURÍCIO & FIGUEIREDO (1991), FURLAN & GIRARDET (1992), MARAVELAKI et al. (1992), SEBASTIAN PARDO et al. (1992), BÖKE et al. (1992), SHERWOOD & DOLSKE (1992), MCGEE (1992), SIKIOTIS et al. (1992), GAURI, TAMBE & CANER-SALTIK (1992), SPADEA (1992), WHALLEY et al. (1992) und MIRWALD & BRÜGGERHOFF (1995).
- mikrobiologische Schädigung (mit oder ohne $\pm$ bedeutende Beteiligung der Luftverschmutzung) von MENTLER et al. (1985, 1986), KRUMBEIN & SCHÖNBORN-KRUMBEIN (1987a, b), ARNOULD (1988), KRUMBEIN & BRAAMS et al. (1991), CANEVA et al. (1992), URZI, KRUMBEIN & PERNICE (1992) und BLASCHKE & JULING (1992).
- physikalische Verwitterungsprozesse von HONEYBORNE & HARRIS (1958), HUDEC (1978a, 1980), MARSCHNER (in KLEMM 1980: 137), LEWIN & CHAROLA (1981), WINKLER (1981), GRIMM (1983: 47), GERARD (1985), BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988a, b), JABLOŃSKA-SZYSZKO & RUDNICKA (1988), KÖHLER (1988) und DÜPPENBECKER & FITZNER (1991: 42, 45).

7.2. Eigene Beobachtungen und Interpretation

Schon im Kap. 4.1. wurde herausgearbeitet, daß die hier untersuchten - und sicher viele weitere - Kalksteine anders als Sandsteine und Kalksandsteine verwittern; denn bei Sandsteinen und Kalksandsteinen dominieren oberflächliche bzw. oberflächennahe Verwitterungsprozesse, während bei diesen Kalksteinen die Schädigung der Oberfläche und der oberflächennahen Bereiche der Mauerstein-Außenseite nur eine untergeordnete Rolle spielt. Demgegenüber kann die mit dem Gefüge-Index gemessene Schädigung des inneren Zusammenhaltes des Kalkstein-Mauersteins durch Risse sehr schwerwiegend sein und die Sicherheit und Stabilität des Bauwerks in Frage stellen. Wenn man nach den Ursachen der in dieser Untersuchung an Kalksteinen beobachteten Schäden fragt, muß man folgende Phänomene als besonders wichtig hervorheben:

- Die geringe Schwere der Oberflächenschäden.
- Die starke Entwicklung von Rissen, die den Gesteinszusammenhalt gefährden.
- Die bisher nie in der Literatur erwähnte Bedeutung des Dimensions-Indexes für den Verwitterungszustand der Mauersteine (gemessen als Gefüge-Index).
- Die große Bedeutung der Porositätsparameter freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio für die Verwitterungsbeständigkeit, die u. a. an ihrer starken positiven Korrelation mit dem korrigierten Gefüge-Index und an der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme (siehe Kap. 5.1.1.) erkennbar ist.
- Die auffälligen Parallelen zum Verwitterungsverhalten von gebrannten Ziegeln.

Diese Zusammenstellung zeigt, daß die in der Literatur sehr oft diskutierte chemische Verwitterung durch den „sauren Regen“ oder die Trockendeposition von Luftschadstoffen für die untersuchten Kalksteine nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt; denn diese anthropogen bedingten Faktoren können nur für die Oberflächenschäden verantwortlich sein - und auch dort nur zu einem Teil, da Niederschlagswasser schon allein durch natürlich enthaltenes CO_2 kalklösend wirkt (siehe z. B.: LIVINGSTON 1992). Im Gegensatz zur Luftverschmutzung läßt sich die durch Risse verursachte hauptsächliche Verwitterungsschädigung der Kalkstein-Mauersteine nur schwer auf menschliches Wirken zurückführen - vorausgesetzt, man zieht nicht die in Abb. 93 skizzierte Möglichkeit in Betracht.



Abb. 93: "anthropogene Verwitterung"

Die viel verheerenderen Risse, die den Stein durchziehen, lassen sich auf Spannungszustände im Gestein zurückführen. Daß bei den untersuchten Kalksteinen die Spannungen (zumindest zu einem überwiegenden Teil) von der Oberfläche ausgehen, zeigt sich daran, daß

- nicht selten die Risse nahe der Außenseite des Mauersteins häufiger und besser entwickelt sind als im Rest des Mauersteins.
- die im Gefüge-Index gemessene Stärke der Schädigung mit dem Dimensions-Index korreliert (siehe Kap. 4.1.2.). Je größer die Außenseite und je geringer die Tiefe des Mauersteins ist, desto stärker wird der Mauerstein durch Verwitterungsprozesse beansprucht.

Da diese Spannungen von der Mauerstein-Außenseite ausgehen, müssen sie witterungsbedingt sein. Die Ultraschall-Untersuchungen (siehe Kap. 4.4.) erwiesen, daß für diese Kalksteine ein großer dynamischer Elastizitäts-Modul charakteristisch ist. Deshalb werden die Spannungen im Gestein viel weiter geleitet als bei Sandsteinen und können, wenn sie groß genug sind, an ganz anderen Stellen im Stein zu Schäden führen. Spannungszustände an der Gesteinsoberfläche erzeugen in Kalksteinen somit (bevorzugt lang aushaltende) Risse. Unter gleichen Witterungsbedingungen reagieren Sandsteine mit geringerem dynamischem Elastizitäts-Modul durch stärkere Schädigung der oberflächennahen Bereiche, während Kalksteine mit größerem dynamischem Elastizitäts-Modul durch stärkere Schädigung des Gesteinszusammenhaltes reagieren. Dieser Aspekt des unterschiedlichen Verwitterungsverhaltens von Sandsteinen und Kalksteinen wird in Abb. 94 schematisch dargestellt.

Auf welchen Ursachen beruhen diese Spannungszustände? Sie können durch frostbedingtes Gefrieren (und Wiederauftauen) von Wasser, Temperaturschwankungen oder Schwankungen des Wassergehaltes (hygrisches Quellen und Schrumpfen) hervorgerufen werden. Wahrscheinlich beruhen diese Spannungen hauptsächlich auf Frosterscheinungen (bzw. Frost-Tau-Wechsel-Prozessen), da der Verwitterungszustand der Mauersteine am stärksten von den Porositätseigenschaften freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio abhängt. Sowohl der (hier nicht erfaßte) Sättigungswert als auch die nah verwandte Schurecht-Ratio wurden aufgestellt, um Aussagen über die Frostbeständigkeit zu machen. So werten z. B. HIRSCHWALD (1911-1912), SCHAFFER (1932: 49-50), HONEYBORNE & HARRIS (1958: 346, 352), LEARY (1981), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 14), ROSS, HART & BUTLIN (1991: 103-105) und die DIN 52106 (11/1972) den Sättigungswert - beziehungsweise die nahe verwandte Schurecht-Ratio - als ein wichtiges Maß für die Frostbeständigkeit poröser Baustoffe. Demgegenüber ist die Anzahl der Kritiker gering - Überblicke über die Diskussion geben das Kapitel 4.3. und HIRSCHWALD (1911), SCHAFFER (1932: 49-50), HONEYBORNE & HARRIS (1958: 346), NIESEL (1982: 86), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982: 11-14) und LANGER (1989: 65). In diesem Zusammenhang sind die Beobachtungen von HONEYBORNE & HARRIS (1958) wichtig, die in einem Diagramm effektive Porosität gegen Sättigungswert abtrugen und damit beständige von unbeständigen Kalksteinen unterscheiden konnten, da sie der Frostverwitterung besonders große Bedeutung beimäßen. ROBINSON, HOLMAN & EDWARDS (1977), die beständige und unbeständige Ziegelsteine durch die Kombination eines Grenzwertes für die freiwillige Wasseraufnahme mit einem Grenzwert für die Schurecht-Ratio ($\text{Schurecht-Ratio} \leq 0,74$ wenn freiwillige Wasseraufnahme $> 8,2$ Vol.-%) voneinander trennten, sahen in der Frostsprennung den wesentlichen Schädigungsprozeß für gebrannte Ziegel. [Ganz allgemein wird in der Literatur im Frost (bzw. Frost-Tau-Wechsel) der Hauptschadensfaktor bei der

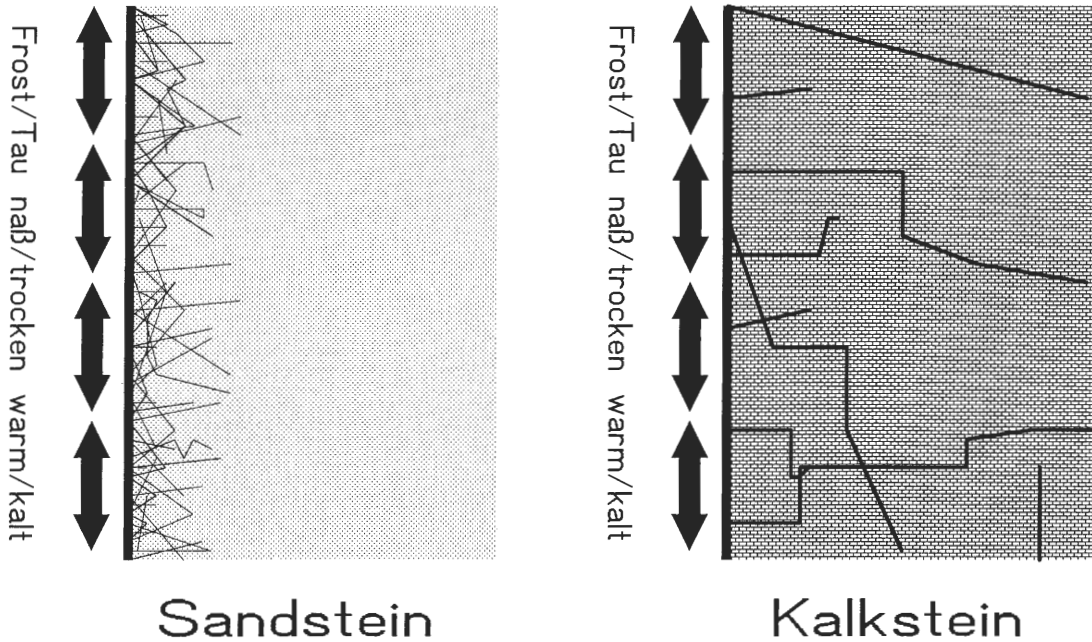


Abb. 94: Schematische Darstellung der Unterschiede in der Rißentwicklung zwischen Sandsteinen ($\pm$ geringer dynamischer Elastizitäts-Modul) und Kalksteinen ($\pm$ großer dynamischer Elastizitäts-Modul).

Ziegelstein-Verwitterung gesehen (siehe z. B.: BENDER & HÄNDLE 1991; KLUGT 1993).]

Auch die im Kapitel 5.1.1. der vorliegenden Arbeit erstmalig beschriebene Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme ergibt Sinn, wenn man sie vor dem Hintergrund der Frosteinwirkung sieht: Nicht nur der mit der Schurecht-Ratio gemessene Grad der Wassersättigung bestimmt die Größe der Frostschädigung, sondern auch die absolute Wassermenge im Gestein, die mit der freiwilligen Wasseraufnahme gemessen wird, ist sehr wichtig. Wenn ein Gestein eine hohe Schurecht-Ratio, aber nur eine geringe freiwillige Wasseraufnahme hat, kann die geringe Wassermenge bei Frost keinen sehr großen Schaden hervorrufen. Umgekehrt ist der entstehende Schaden ebenfalls gering, wenn zwar viel Wasser (große freiwillige Wasseraufnahme) aber auch sehr viel luftgefüllter Porenraum (kleine Schurecht-Ratio) vorhanden ist.

Der Umstand, daß in der vorliegenden Untersuchung eine positive Korrelation zwischen korrigiertem Gefüge-Index und Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand festgestellt wurde, läßt sich ebenfalls als Indiz für frostbedingte Verwitterung werten; denn LEWIN & CHAROLA (1981) erkannten, daß plattige oder fibröse Silikate besser Wasser mittels Kapillarkräften festhalten und so zu verstärkten Frostschäden führen können. Außerdem beobachteten NIJS (1985), NIJS et al. (1988: 113) und NIJS & DE GEYTER (1991: 671) eine positive Korrelation zwischen der Stärke der Frostschädigung und dem Gehalt an Silt und Ton im Kalkstein.

Neben Frost und/oder Frost-Tau-Wechseln, die an erster Stelle stehen, wirken vielleicht auch noch frost-unabhängige Temperaturschwankungen und Schwankungen des Wassergehaltes in untergeordneter Rolle rißbildend. Als Indiz für die Wirkung von Temperaturschwankungen kann man die rasterelektronenmikroskopische Beobachtung werten, daß Mikrorisse in einigen Fällen von Kalzit-Kristallen ausgehen, die erheblich größer als die in ihrer Umgebung sind (siehe Kap. 4.5.). Allerdings ist die schädigende Wirkung der Temperaturschwankungen für diese Kalksteine bestimmt nicht so groß, wie es KÖHLER (1988: 657), BLASCHKE (1988: 284) und SAGE (1988) für Marmor annehmen. Die schädigende Wirkung des salzsäureunlöslichen Rückstands läßt sich auch durch quellfähige Tonminerale erklären (siehe Kap. 4.6.1.), so daß Schwankungen des Wassergehaltes auch eine gewisse Bedeutung für die Rißbildung haben mögen.

In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß HUDEC (1978a) dem hier untersuchten Material vergleichbare Schäden auch in Gebieten ohne Frost-Einwirkung beobachtet, und die mit den gängigen Laboruntersuchungen meßbare „Frost-Empfindlichkeit“ bei Kalksteinen als Empfindlichkeit gegen Befeuchtungs-Austrocknungs-Zyklen interpretiert. HUDEC (1980: 508) geht sogar so weit, Frieren und Tauen als Trocknen und Befeuchten unterhalb des Gefrierpunktes zu interpretieren. Wenn man sich dieser Ansicht von HUDEC (1980) anschließen sollte, wird allerdings jede Differenzierung zwischen Frost-Tau- und

Befeuchtungs-Austrocknungs-Zyklen sinnlos. Da aber das Konzept von HUDEC (1978a, 1980) nicht allgemein angenommen wurde und eine Differenzierung zwischen beiden Beanspruchungstypen aus praktischen Gründen sinnvoll ist, wird diesem Konzept hier nicht weiter gefolgt. In den Arbeiten von HUDEC (1978a, 1980) scheint aber ein Problem auf, das sich bei Betrachtung anderer wichtiger moderner Arbeiten verdichtet (siehe z. B.: LITVAN 1980; BAZANT et al. 1988; PROUT & HOFF 1991; ROSS, HART & BUTLIN 1991: 97-98; WEISS 1992; FRANKE & BENTRUP 1993a: 484-486): Es gibt noch keine Theorie der Eisbildung und Frostwirkung bei porösen Baustoffen, die eine vollständige Beschreibung der Prozesse sowie Erklärung der beobachtbaren Phänomene liefert und allgemein akzeptiert wird.

Obwohl es noch theoretische Probleme bei der Frostwirkung gibt, kann für die Aufweitung der entstandenen Haarrisse im wesentlichen die als Frostsprengung bezeichnete Wirkung gefrierenden Wassers verantwortlich gemacht werden. Den Ausführungen von LITVAN (1980: 458-459) läßt sich entnehmen, daß diese Form der Frostschädigung bei häufigen und schnellen Frost-Tau-Wechseln besonders stark wirkt; denn beim Abkühlen sammelt sich das Wasser in den Rissen, aber beim Erwärmen kann das Wasser nur langsam in die Gesteinsporen zurückwandern, so daß das Wasser beim nächsten Gefrieren durch seine 9%ige Volumenausdehnung den Riß aufweitet und (infolge der Erzeugung neuer Spannungen) verlängert. Mit einem anderen, theoretischen Modell erklären WALDER & HALLET (1985), daß fortschreitende Frostwirkung auch bei kontinuierlichem Frost möglich ist.

Zwar ließen sich unter dem Rasterelektronenmikroskop (siehe Kap. 4.5.) auch Anlösungsspuren an Mikrorissen und pflanzliche Geflechte auf Rißflächen beobachten, aber diese Erscheinungen waren ziemlich selten und bei weitem nicht so intensiv entwickelt, als daß sich die Rißaufweitung hauptsächlich auf sie zurückführen ließe. Einen gewissen Beitrag zur Aufweitung der Risse dürften sie allerdings leisten. Außerdem zeigen diese Phänomene eindeutig, daß diese Risse schon längere Zeit existiert haben, also Dauerbrüche wie die von KIESLINGER (1932: 132-133) beschriebenen Frostschäden sind.

Das Probenkollektiv P zeigt mit seinen zwei Mauerstein-Generationen sehr anschaulich, wie mit fortschreitender Expositionsdauer in einem primär sehr gering porösen Kalkstein immer mehr Porosität durch Rißbildung und -aufweitung entsteht (siehe Kap. 4.3.). Mit zunehmender Porosität ist dabei eine Beschleunigung der Schädigungsprozesse zu erwarten, da die entstandene Porosität durch ihre hohe bis sehr hohe Schurecht-Ratio sehr ungünstige Eigenschaften zeigt. In logischer Konsequenz ist zu erwarten, daß beim Fortschritt der Verwitterung dieses Kalksteins die primären (d. h. sedimentär und diagenetisch angelegten) Unterschiede in der Porosität verstärkt und nicht verringert werden.

LEWIN & CHAROLA (1978: 696-698) beschreiben an im ariden Klima des Irans verwitterten Kalksteinen eine gravierende Schädigung durch die Aufweitung und Ausdehnung kleiner Risse infolge der Wiederausscheidung gelösten Kalziumkarbonates. Nach LEWIN & CHAROLA (1978: 696) führt dieser Prozeß meist zu oberflächennahen Schäden; wenn aber schon Risse im Gestein sind, kann dieser Prozeß zum Lockern und Herausbrechen großer Stücke des Mauersteins führen. Da ich im vorliegenden Material keine Hinweise auf die Wiederausscheidung gelösten Kalziumkarbonates in verwitterungsbedingten Rissen beobachten konnte, kann dieser Prozeß keine Rolle für die Rißaufweitung spielen.

Es bleibt nur noch zu fragen, welche Rolle die Schicht- und Kluffflächen sowie die Stylolithen und die sparitverteilten Risse spielen. In diesem Zusammenhang ist die Feststellung von KIESLINGER (1932: 132) interessant, daß die Frostwirkung „kleine Fehlstellen zu Dauerbrüchen“ ausarbeitet (siehe auch KIESLINGER 1949: 360). DE QUERVAIN (1967: 140) schreibt über die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen: „Die Zerfallerscheinungen (besonders durch Frost) gehen bei den Kalksteinen in der Regel von... ..Inhomogenitäten (natürlichen Klüften, Nähten und Tönhäuten) oder von bei der Gewinnung und Verarbeitung entstandenen feinsten Rißen (besonders bei den spröden, ganz feinkristallinen Kalken) aus, eine Zerbröckelung bewirkend.“ Daß die Schicht- und Kluffflächen Ansatzstellen für die Rißbildung darstellten, erweist sich im untersuchten Material zum einen an der Anordnung der Risse in Scharen parallel und senkrecht zur Schichtung (siehe Kap. 4.1.) und zum anderen an der geringeren Verwitterungsbeständigkeit feingeschichteter Kalksteine (siehe Kap. 4.2.2.). BELOYANNIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988a: 81-83) beobachteten in einem Mikrit mit tonmineraführenden Stylolithen, daß die im Frost-Wechsel-Versuch entstehenden Risse von den Stylolithen ausgingen. Vergleichbares stellte NIJS (1991: 64) an einem Crinoidenkalk mit Stylolithen fest. Auch in dieser Untersuchung konnte für die Probenkollektive K und S festgestellt werden, daß ein Mindestmaß an Stylolithen und/oder sparitverteilten Rissen als primären Schwachstellen notwendig war. Derartige Schwachstellen sind (ebenso wie Schicht- und Kluffflächen) Ansatzpunkte für Spannungszustände und/oder Frostsprengung. Darüberhinaus haben sie aber keine Bedeutung, wie die statistische Auswertung zeigte (siehe Kap. 4.2.3.).

Die vorgestellten Überlegungen zeigen, daß sich die Schädigung der Kalksteine durch Risse hauptsächlich auf die Einwirkung von Frost bzw. Frost-Tau-Wechseln zurückführen läßt. Ein gründliches Literaturstudium bestätigt diese Überlegungen, denn in einigen Arbeiten wird eine Schädigung von Bausteinen durch Risse, die den Gesteinszusammenhalt gefährden (bzw. zerstören), beschrieben. Da LITVAN (1980: 456)

darauf hinweist, daß die Hauptcharakteristika der Frostwirkung für alle Klassen poröser Festkörper gleich sind, wird verständlich, daß fast alle Autoren, die derartige Riß-Schäden beschreiben, sie auf Frosteinwirkung (bzw. Frostsprengung) zurückführen, obwohl es sich um unterschiedliche Materialien handelt:

- a) Kalksteine: KIESLINGER (1932: 113) beschreibt durch Frosteinwirkung hervorgerufene zerstörerische Rißbildung in bruchfeuchten Kalksteinen. DE QUERVAIN (1945: 19-21, 42-43), KNÖFEL (1980: 102) und WIHR (1986: 56-58) führen den bei Kalksteinen verbreiteten Bröckelzerfall in vielen Fällen auf Frosteinwirkung zurück. HOSEK & SKUPIN (1978) führen die von ihnen an Pläner-Kalkstein beobachtete Schädigung des Gesteinszusammenhaltes durch Risse überwiegend auf Frost zurück. ROSS, HART & BUTLIN (1991: 98-99) werten den Stein zersplattende Risse als eine typische Frostschädigung. BELOYANIS, THEOULAKIS & HARALAMBIDES (1988a, b) deuten die intensive Rißbildung in einem griechischen Mikrit als Frostschäden und konnten vergleichbare Risse im Frost-Tau-Wechsel-Versuch erzeugen. WINKLER (1973: 178-179) bildet zwei Fälle von Ausbildung überwiegend schichtparalleler Risse in Kalksteinen ab, die er als Frostschäden interpretiert.
- b) Sandsteine und Kalksandsteine: KIESLINGER (1932: 119-120, Abb. 93) beobachtete Frostrisse in tonigem Kalksandstein und mergeligem Sandstein. PENKALA & BRALEWSKA (1976: 222, Abb. 5) fanden durch Frost hervorgerufene Risse in einem feinkörnigen Sandstein. Ein Teil der von AMOROSO & FASSINA (1983: 23-24) Frost-Tau-Wechselversuchen unterzogenen Sandsteine zeigte tiefreichende Risse. Vergleichbares dokumentierte FITZNER (1970: 193-200).
- c) gebrannte Ziegel: Lang durchlaufende Risse und scharfkantige Scherben sind nach KIESLINGER (1932: 116-118) charakteristische Formen der Frostsprengung in Ziegeln. VAN GEMERT & VAN BALEN (1988: 69, Abb. 4), NAKAMURA (1988a, b) und PROUT & HOFF (1991) beschreiben an Ziegelsteinen, die sie Frost-Tau-Wechsel-Versuchen unterzogen, zahlreiche, den Zusammenhalt des Steines zerstörende Risse. Vergleichbares dokumentieren WEST (1970: Abb. 1) und FRANKE & BENTRUP (1993a: Abb. 1-4) von Ziegeln aus frostgeschädigtem Mauerwerk. Ebenso beobachten FRANKE, BENTRUP & SCHUMANN (1993a: 16, Abb. 3; 1993b: 45, 47) vereinzelt eine tiefgreifende Zerrüttung der Ziegelsteine durch Risse, die sie auf Frostscha den zurückführen. Zahlreiche Beispiele für derartige Frostscha den an Ziegelsteinen in der Natur und im Frost-Tau-Wechsel-Versuch stellt KLUGT (1993) vor.

Es läßt sich resümieren, daß die hauptsächliche Schädigung von Naturbausteinen aus Kalkstein auf physikalischen Verwitterungsprozessen beruht, die vom Menschen unabhängig sind. Eine zentrale Bedeutung besitzen dabei die Eigenschaften des Porenraums. Demgegenüber spielt die durch die anthropogene Luftverschmutzung verstärkte Oberflächenverwitterung nur eine untergeordnete Rolle. Vergleichbares gilt für gebrannte Ziegelsteine.

Allerdings ist von einer voreiligen Übertragung dieser Ergebnisse auf andere Baustein-Typen abzuraten, da z. B. bei Kalksandsteinen die Schädigung der Oberflächen (auch und gerade durch SO_2) viel gravierender ist (siehe z. B.: SCHOLTEN et al. 1991; KRAUS 1985: 3; MIRWALD 1987b: 268-269, 406-408; MIRWALD & ZALLMANZIG et al. 1987: 287-288; NIJS 1985: 16-17; NIJS et al. 1988; KETTELHACK 1988, 1992; VENDRELL-SAZ & GARCIA-VALLES 1992; BRÜGGERHOFF & MIRWALD 1992). So bestehen z. B. die Skulpturen, an denen WINKLER (1973: 87, 149, 150) die verheerende Stärke der durch die Luftverschmutzung verursachten Natursteinschäden demonstriert, aus Baumberger Sandstein und Soester Grünsandstein, zwei häufig verwandten Kalksandsteinen. Die erheblich stärkere Anfälligkeit von Kalksandsteinen gegenüber der Luftverschmutzung läßt sich durch ihre abweichende Zusammensetzung erklären:

Die aggressiven Bestandteile in der verschmutzten Luft und dem „sauren Regen“ (insbesondere SO_2 , das zu SO_3 oxidiert wird) reagieren bei $\pm$ reinen Kalksteinen sofort auf der Steinoberfläche zu löslichen Salzen (insbesondere CaSO_4), die dann durch ablaufendes Wasser leicht abgewaschen werden können. Dementsprechend tritt bei $\pm$ reinen Kalksteinen auf dem Regen ausgesetzten Flächen als einzige Schädigung der direkte Lösungsabtrag auf.

Anders sind die Verhältnisse bei Kalksandsteinen: Neben einem relativ hohen Tonmineral-Gehalt (ca. 5-30 %) führen sie einen großen Anteil an Silikat-Partikeln (ca. 5-25 % Quarz), die durch Karbonatzement verkitet werden (MIRWALD 1987b; KETTELHACK 1988, 1992; HILBERT 1991; VENDRELL-SAZ & GARCIA-VALLES 1992). Da die aggressiven Bestandteile mit dem Karbonatanteil reagieren, zerstören sie selektiv den Zement - und zerstören somit die Bindung der Körner aneinander - und können tiefer ins Gestein eindringen. Dort werden die entstehenden Salze nicht sofort ausgewaschen, sondern können durch die Wechsel von Kristallisation und Lösung sowie Hydratation und Dehydratation das Gestein im oberflächennahen Bereich stark schädigen. Diese Schädigungsprozesse werden durch den relativ hohen Tonmineral-Gehalt weiter gefördert.

8. Zusammenfassung und Diskussion

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen verschiedenen Varietäten eines Kalksteins zu erkennen, zu erklären und vorherzusagen. Da das Literaturstudium zeigte, daß die bisher angewandten Vorgehensweisen zur Erreichung dieses Zieles nicht geeignet sind, wurde eine neue Vorgehensweise entwickelt:

Gegenstand der Untersuchungen waren Kalkstein-Mauersteine aus den Außenmauern von steinsichtigen Gebäuden, die schon eine lange Zeit der Verwitterung ausgesetzt waren; denn dadurch ist gesichert, daß die Untersuchungsergebnisse auf die Realität am Bauwerk übertragbar sind. Um Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit erkennen zu können, war es jeweils notwendig, ein möglichst umfangreiches Probenkollektiv zu untersuchen, das von einem Standort mit einheitlicher Verwitterungsexposition und Bauwerks-Geschichte stammt. Für die Bestimmung des Verwitterungszustands wurde nicht nur die Oberfläche der Mauerstein-Außenseite, sondern der gesamte Mauerstein berücksichtigt. An Proben aus dem ($\pm$ unverwitterten) Kern des Mauersteins wurden potentiell verwitterungsrelevante Gesteinsparameter mittels Dünnschliff-Untersuchungen, Messungen mit der Auftriebsmethode, Ultraschall-Untersuchungen, Rasterelektronenmikroskopie und geochemischen Untersuchungsmethoden erfaßt. Die durch die Untersuchung des Probenkollektivs erhaltenen Informationen wurden - wenn möglich - durch Aufschlußaufnahmen am Herkunftsort der Steine ergänzt, um so die verwitterungsbeständigsten Werkstein-Varietäten (bzw. Gesteinsbänke) herauszufinden. Durch die Anwendung dieser Methodik auf verschiedene Kalksteine ließen sich allgemeine Prinzipien der Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen herausarbeiten.

Es wurden folgende Kalksteine in folgenden Probenkollektiven untersucht:

- Wellenkalk des Unteren Muschelkalks (Schwesternhaus der ehemaligen Städtischen Kliniken Osnabrück, 41 Mauersteine);
- Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks (Burg Sparrenberg in Bielefeld, 17 Mauersteine);
- Beisinghäuser Kalkstein des Devons (Kirche St. Pankratius in Eslohe-Reiste, 30 Mauersteine).
- Terebratelkalk des Oberen Muschelkalks (evangelisch-reformierte Kirche in Oerlinghausen-Helpup, 30 Mauersteine).

Die bisher verwandten Klassifikationen zur Feststellung des Verwitterungszustands von Bausteinen konzentrieren sich zu sehr auf Schäden an der Gesteinsoberfläche von Sandsteinen und/oder erfassen nur Schäden durch Oberflächenabtragung. Alle in der Literatur angeführten Klassifikationen sind deshalb für die untersuchten Kalkstein-Mauersteine nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde folgende neue Klassifikation entwickelt:

- Die Oberflächenschäden auf der Außenseite werden mit dem Grad der Oberflächenschädigung quantifiziert; die Skala der Schäden umfaßt vier Schweregrade.
- Die Stärke der Schädigung des inneren Zusammenhaltes des Mauersteins durch Risse wird mit dem Gefüge-Index angegeben. Der Gefüge-Index ergibt sich durch Multiplikation aus dem Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes, der nach äußerer Begutachtung der Häufigkeit und Entwicklung der Risse des Mauersteins abgeschätzt wird, und dem Grad der Schädigung bei der Präparation, der angibt, wie sehr der Mauerstein beim Sägen und Formatieren zerfallen ist. Die Skala des Grades der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes umfaßt sechs Grade: 1 für neue Mauersteine, 2 für ungefährdete alte Mauersteine ... 6 für in Stücke zerfallene alte Mauersteine. Der Grad der Schädigung bei der Präparation reicht von Grad 1 (keine Schädigung) bis 4 (starke Schädigung). Mit zunehmender Schädigung des inneren Zusammenhaltes wird der Gefüge-Index größer; seine Skala reicht für alte Mauersteine von 2 (keine feststellbaren Schäden) bis 24 (extrem stark geschädigt).

Die Anwendung dieser neuen Klassifikation auf die untersuchten Kalksteine ergab, daß die Oberflächenschäden nur $\pm$ gering entwickelt sind und auch nur geringe Bedeutung besitzen, da sie bloß ein „kosmetisches“ Problem darstellen. Viel wichtiger ist die - früher nie stärker beachtete - durch den Gefüge-Index angegebene Schädigung des inneren Zusammenhaltes, da sie die Sicherheit und Stabilität des Bauwerks gefährdet. Ebenfalls neu und von großer Bedeutung ist die Erkenntnis, daß der Gefüge-Index mit zunehmender Größe der Mauerstein-Außenseite und abnehmender Tiefenreichweite des Mauersteins zunimmt. Für die Praxis resultieren daraus Mindesteinbautiefen von 15-20 cm für Mauersteine. Da dieser Effekt den Gefüge-Index beeinflusst, ohne von der Gesteinszusammensetzung abzuhängen, ist er für die Fragestellung des Forschungsprojektes störend; deshalb wurde er durch die Umrechnung in den korrigierten Gefüge-Index neutralisiert. Der korrigierte Gefüge-Index reicht ebenso wie der Gefüge-Index von 2 (keine feststellbaren Schäden) bis 24 (extrem stark geschädigt) und ist das Ergebnis einer mathematischen Korrektur des Ein-

flusses der Größe der Mauerstein-Außenseite und der Tiefenreichweite des Mauersteins auf den Gefüge-Index.

Die mit den Dünnschliffen durchgeführte Mikrofazies-Analyse ermöglichte es, im Trochitenkalk von Bielefeld 4 Mikrofaziestypen, im Wellenkalk von Osnabrück 6 Mikrofaziestypen, im Beisinghäuser Kalk von Eslohe-Reiste 4 Mikrofaziestypen und im Terebratelkalk von Oerlinghausen-Helpup 4 Mikrofaziestypen zu unterscheiden. Durch die Untersuchung der Probenkollektive ist es erstmalig gelungen, Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit zwischen den verschiedenen Mikrofaziestypen eines Kalksteins zu erkennen (siehe Abb. I) und zu erklären: Zu einem Teil beruhen die Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit auf Unterschieden in den Porositätsparametern (siehe unten), zu einem anderen Teil auf Unterschieden in der Anordnung und Bindung der Kalkstein-Komponenten. Die besonders verwitterungsbeständigen Mikrofaziestypen 5 (Schalen-Wackestone) und 6 (Detritus-Wackestone) des Osnabrücker Wellenkalks sind nicht feingeschichtet, während die weniger verwitterungsbeständigen Mikrofaziestypen 7-9 des Osnabrücker Wellenkalks deutlich feingeschichtet sind. Kalksteine, in denen die Komponenten durch einen Sparit-Zement verkittet sind, sind verwitterungsbeständiger als Kalksteine, in denen die Komponenten in einer Mikrit-Matrix schwimmen; deshalb sind der Mikrofaziestyp 2 (schlecht ausgewaschener Rudstone) des Trochitenkalks und der Mikrofaziestyp 12 (Grainstone aus Bioklasten) des Beisinghäuser Kalks besonders verwitterungsbeständig. Zwischen den Mikrofaziestypen 15-17 des Terebratelkalks lassen sich keine Unterschiede der Verwitterungsbeständigkeit erkennen, da in ihnen Verwitterungsbeständigkeits-Unterschiede aufgrund unterschiedlichen Bindemittels (Sparit oder Zement) und solche aufgrund von Unterschieden in den Porositätsparametern antagonistisch zusammenwirken.

Die detaillierte Untersuchung der Entstehungsbedingungen der Mikrofaziestypen zeigte, daß Kalksteine, die in $\pm$ turbulentem (und damit $\pm$ flachem) Meereswasser abgelagert wurden, tendenziell verwitterungsbeständiger sind als solche aus anderen Ablagerungsräumen. Das könnte wichtige Konsequenzen für die Suche nach Lagerstätten verwitterungsbeständiger Kalksteine haben. Für den Osnabrücker Wellenkalk läßt sich feststellen, daß besonders verwitterungsbeständige Kalksteine auf zwei geringmächtige Horizonte (μOa und μOc) im Oolithbank-Member der Wellenkalk-Formation beschränkt sind.

Die Erfassung der Häufigkeit und Entwicklung von Stylolithen und sparitverheilten Rissen in den Dünnschliffen zeigte, daß ein Mindestmaß an Stylolithen und/oder sparitverheilten Rissen als primären Schwachstellen notwendig war, damit es zu einer Schädigung des inneren Zusammenhaltes kommen konnte. Die statistische Auswertung ließ aber keine darüber hinausgehende Bedeutung für die Verwitterungsbeständigkeit der untersuchten Kalksteine erkennen.

Mittels der Auftriebsmethode wurden die Porositätsparameter Trockenrohddichte, freiwillige Wasseraufnahme, effektive Porosität und Schurecht-Ratio (= freiwillige Wasseraufnahme geteilt durch effektive Porosität) bestimmt. Freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio beeinflussen die Verwitterungsbeständigkeit sehr stark; wenn ihre Größe zunimmt, nimmt die Verwitterungsbeständigkeit ab (siehe Abb. II). Auffällig ist in diesem Zusammenhang, daß sich gebrannte Ziegelsteine vergleichbar verhalten.

Der im Rahmen der Ultraschall-Untersuchungen gemessene dynamische Elastizitäts-Modul gibt eine Erklärung für das von Sandsteinen abweichende Verwitterungsverhalten der Kalksteine. Er ist erheblich höher als bei Sandsteinen, so daß im Kalkstein Spannungen viel weiter geleitet werden und zu (lang aushaltenden) Rissen führen. Die Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop zeigten, daß - anders als bei Sandsteinen - der größte Teil der Porosität durch mikroskopisch kleine Risse entsteht. Diese Mikrorisse können von Kalzit-Kristallen, die erheblich größer als die Kristalle in ihrer Umgebung sind, oder von Tonmineral-Partikeln ausgehen. Vereinzelt auftretende Korrosionsspuren oder pflanzliche Geflechte belegen, daß es sich um Dauerbrüche handelt.

Als erster Teil der geochemischen Untersuchungen wurde der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand im Kalkstein gemessen. Wenn er zunimmt, nimmt die Verwitterungsbeständigkeit ab (siehe Abb. III). Für diese Wirkung lassen sich verschiedene Erklärungen anführen - wie z. B. Schädigung durch Quellen und Schrumpfen der Tonminerale sowie Förderung von Frostschäden. Für die Verwitterungsbeständigkeit ist auch nachteilig, daß mit zunehmendem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand die Schurecht-Ratio größer wird und die Häufigkeit von Stylolithen zunimmt.

Die im salzsäurelöslichen Gesteinsanteil mit dem Atomemissionsspektrometer (ICP-AES) gemessenen Konzentrationen der Elemente Kalzium, Magnesium, Eisen, Natrium, Kalium, Strontium, Barium, Aluminium und Mangan wurden umfassend statistisch ausgewertet. Damit konnte nachgewiesen werden, daß sie keine Rolle für die Verwitterungsbeständigkeit der Kalksteine spielen. Die Gehalte an Kalzium, Aluminium und Kalium korrelieren zwar mit der Verwitterungsbeständigkeit, aber das läßt sich direkt aus ihren engen Korrelationen mit dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand ableiten. Die am ICP-AES gemessenen Element-Gehalte und die daraus gebildeten Quotienten liefern einen Beitrag zur Identifizierung und Charakterisierung der verschiedenen Kalkstein-Typen. Dieser Beitrag ist aber nur gering.

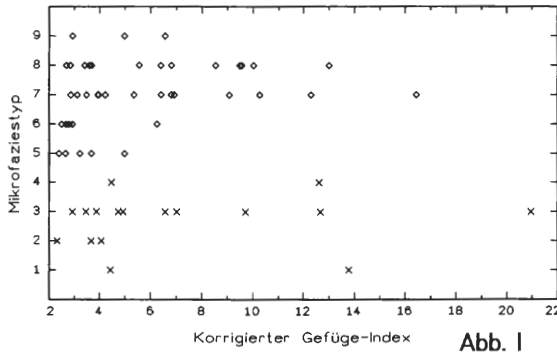


Abb. I

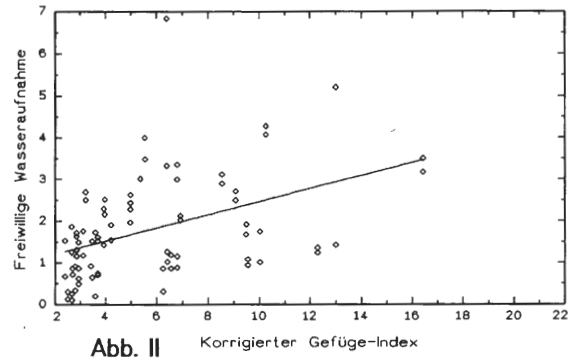


Abb. II

Abb. I: Korrigierter Gefüge-Index der Mauersteine aus den unterschiedenen Mikrofaziestypen. (Der korrigierte Gefüge-Index dient als Maß für den Verwitterungszustand: Je größer er ist, desto stärker ist der Mauerstein verwittert.) Die Abszisse gibt den korrigierten Gefüge-Index eines Mauersteins an. Der Mikrofaziestyp des Mauersteins läßt sich an der Ordinate ablesen. Es sind die Mikrofaziestypen 1-4 (= Trochitenkalk von Bielefeld) miteinander und die Mikrofaziestypen 5-9 (= Wellenkalk von Osnabrück) miteinander zu vergleichen. x = Mikrofaziestypen 1-4; ◇ = Mikrofaziestypen 5-9.

Abb. II: Korrelation zwischen der freiwilligen Wasseraufnahme (in Vol.-%) und dem korrigierten Gefüge-Index (als Maß für den Verwitterungszustand). Wellenkalk von Osnabrück.

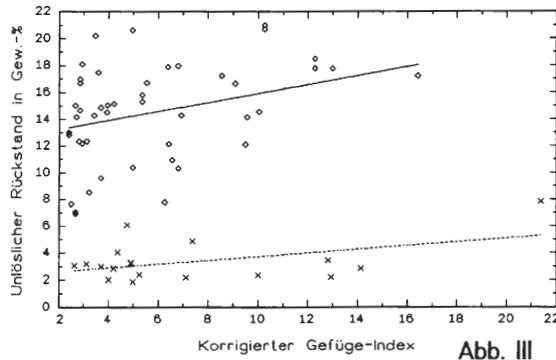


Abb. III

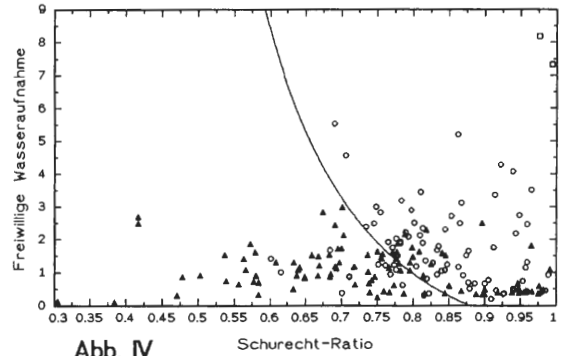


Abb. IV

Abb. III: Korrelation zwischen dem Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand (in Gew.-%) und dem korrigierten Gefüge-Index (als Maß für den Verwitterungszustand).

x = Trochitenkalk von Bielefeld; ◇ = Wellenkalk von Osnabrück.

Abb. IV: Verlauf der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme. Diese Grenzlinie wurde empirisch ermittelt als Linie, die über- und unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Mauersteine möglichst gut voneinander trennt. Mit □ sind rechts oben Gelbkalke aus dem Wellenkalk markiert.

▲ = überdurchschnittlich verwitterungsbeständige Mauersteine (alle Probenkollektive);

○ = unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Mauersteine (alle Probenkollektive).

Die synoptische Interpretation der Untersuchungsergebnisse zeigte, daß die Verwitterungsbeständigkeit der bearbeiteten Kalksteine am stärksten von den Porositätsparametern freiwillige Wasseraufnahme und Schurecht-Ratio beeinflusst wird. Im Vergleich dazu ist der Einfluß des Gehaltes an salzsäureunlöslichem Rückstand auf die Verwitterungsbeständigkeit eines Kalksteins erheblich geringer. Einen sehr großen praktischen Nutzen für Prognosen über die Verwitterungsbeständigkeit verspricht die in dieser Arbeit erstmalig ermittelte Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme, die unabhängig vom Probenkollektiv überdurchschnittlich und unterdurchschnittlich verwitterungsbeständige Kalkstein-Mauersteine mit ziemlich großer Schärfe voneinander trennt (siehe Abb. IV). Möglicherweise gilt sie sogar für andersartige poröse Baustoffe (wie z. B. gebrannte Ziegel). Darauf aufbauend wurde ein neuartiges, leicht durchführbares Verfahren zur Auswahl besonders verwitterungsbeständiger Kalksteine entwickelt und erprobt, das folgende zwei Auswahlkriterien hat:

1) Die (neu eingeführte) Sättigungsdifferenz soll kleiner als Null sein, d. h. die Schurecht-Ratio des Kalk-

steins soll kleiner als der Wert der Schurecht-Ratio an der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme bei gleichgroßer freiwilliger Wasseraufnahme sein.

- 2) Der Gehalt an salzsäureunlöslichem Rückstand soll kleiner als das arithmetische Mittel des Probenkollektivs sein.

Obwohl freiwillige Wasseraufnahme, Schurecht-Ratio und salzsäureunlöslicher Rückstand die Verwitterungsbeständigkeit eines Kalksteins sehr stark beeinflussen, reichen sie allein noch nicht zu einer sicheren Prognose über seine Verwitterungsbeständigkeit aus. Denn für die Verwitterungsbeständigkeit spielen auch mit dem Mikrofaziestyp verknüpfte Eigenschaften - wie z. B. Feinschichtung und Kristallgröße (Mikrit/Sparit) - eine gewisse Rolle. Die Entwicklung von Styolithen hat nur nachrangige Bedeutung. Es konnte gezeigt werden, daß normalerweise die verschiedenen verwitterungsrelevanten Gesteinsparameter synergistisch zusammenwirken. Danach wurde versucht, durch Anwendung der „Fuzzy Logic“ Prognosen über die Verwitterungsbeständigkeit zu ermöglichen. Während damit innerhalb eines Probenkollektivs Trends ziemlich zuverlässig erkannt werden konnten, ist die Entwicklung eines für Kalksteine allgemein gültigen mathematischen Modells noch nicht gelungen.

Die vorherrschende Literaturmeinung ist, daß Kalksteine hauptsächlich durch eine infolge der Luftverschmutzung verstärkte Abtragung/Zerstörung der Oberfläche geschädigt werden. Im Gegensatz dazu wurden die hier untersuchten Kalksteine im wesentlichen durch Risse geschädigt, die aufgrund von an der Gesteinsoberfläche erzeugten Spannungszuständen entstanden. Wahrscheinlich beruhten diese Spannungen hauptsächlich auf Frosterscheinungen (bzw. Frost-Tau-Wechsel-Prozessen), da der Verwitterungszustand der Mauersteine am stärksten von den Porositätseigenschaften Schurecht-Ratio und freiwillige Wasseraufnahme abhängt. Die entstandenen Risse wurden im wesentlichen durch Frostsprengung geweitet und verlängert; Lösungsprozesse und pflanzliche Geflechte haben für die Aufweitung der Risse nur eine geringe Bedeutung. Die Schädigung der Gesteinsoberfläche ist $\pm$ gering, so daß die chemische Verwitterung für Kalksteine nicht wichtig sein kann. Dadurch unterscheiden sich Kalksteine in ihrem Verwitterungsverhalten sehr stark von Kalksandsteinen, da bei Kalksandsteinen die Schädigung der Oberflächen (auch und gerade durch SO_2) viel gravierender ist.

Rückblickend läßt sich konstatieren, daß das Forschungsziel in seinen wesentlichen Punkten erreicht wurde. Es konnten sogar Zusammenhänge zwischen dem sedimentären Environment und der Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen erarbeitet werden, die für die Prospektion neuer Kalkstein-Lagerstätten relevant werden können. Darüber hinaus zeigte sich, daß die vorherrschenden Ansichten über die Art und Entwicklung der Verwitterung von Kalksteinen unzutreffend sind. Das resultierende neue Bild der Kalkstein-Verwitterung weist zahlreiche Parallelen zur Verwitterung anderer poröser Baustoffe auf - besonders erwähnt seien gebrannte Ziegelsteine. An dieser Stelle eröffnen sich Möglichkeiten und Fragen, die aus dem Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen weit herausfallen: Ist es möglich, für andere Naturstein-Gruppen und steinartige Baustoffe mit derselben Methodik besonders verwitterungsbeständige Typen herauszufinden? Sollten z. B. Untersuchungen an gebrannten Ziegelsteinen die Vermutung bestätigen, daß die in dieser Arbeit aufgestellte Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme auch für Ziegelsteine gilt, wäre dies eine schnelle, einfache und preiswerte Methode der Qualitätsprüfung.

Allerdings gibt es bei der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme (siehe Abb. IV) noch Forschungsbedarf. Hier schlägt sich die größte Schwäche der in dieser Arbeit entwickelten Vorgehensweise am stärksten nieder: Da der Untersuchungsgegenstand Probenkollektive sind, die zahlreiche vollständige Mauersteine aus einem in sich einheitlichen Außenmauerteil eines historischen Gebäudes umfassen, ist es sehr schwierig, an zur Untersuchung geeignete Probenkollektive zu gelangen. Selbst bei großen Restaurierungsarbeiten werden nur stark geschädigte Steine ausgetauscht, so daß die zum Vergleich unbedingt notwendigen nicht oder wenig geschädigten Mauersteine fehlen. Aufgrund dieser Schwierigkeiten konnten auch nur vier verschiedene Kalksteine untersucht werden. Da diese Kalksteine - wie die meisten in Deutschland als Naturbaustein verwandten Kalksteine - eine ziemlich geringe Porosität besitzen, ist bis jetzt der Verlauf der Grenzlinie Schurecht-Ratio/freiwillige Wasseraufnahme nur für geringporöse Kalksteine (freiwillige Wasseraufnahme < 7 Vol.-%) gesichert. Leider sind alle Bemühungen erfolglos geblieben, Probenkollektive aus poröseren Kalksteinen entnehmen zu können. Ganz allgemein ist die Schwierigkeit, an geeignete Probenkollektive zu gelangen, das einzige Hindernis bei der Anwendung der hier entwickelten Vorgehensweise auf beliebige andere Kalksteine. Bewußt wurde auf Untersuchungs- und Prüfungsmethoden zurückgegriffen, die ohne großen technischen, finanziellen, personellen und zeitlichen Aufwand durchführbar sind, um zu erreichen, daß jede interessierte Arbeitsgruppe oder Institution im In- und Ausland - selbst bei bescheidener Ausstattung - die vorgestellte Methodik anwenden kann.

9. Dank

Diese Arbeit ist das Ergebnis eines Forschungsprojektes, das der Verfasser am Geologisch-Paläontologischen Institut der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster durchführte. Dankenswerterweise unterstützten zahlreiche Personen und Institutionen den Verfasser bei diesem Forschungsprojekt mit Rat und Tat. Herr Prof. Dr. K. POLL betreute das Projekt und die DFG unterstützte es mit einem Stipendium (Nr.: Ma 1427/1-1). Wichtige Ratschläge und Diskussionsbeiträge gaben Herr Dr. G. HILBERT (FH Münster) und Herr Prof. Dr. R. BLASCHKE (Universität Münster).

Das Westfälische Amt für Denkmalpflege (Münster) unterstützte mich bei der Suche nach Bauwerken, die zur Entnahme eines Probenkollektivs geeignet waren. Die Entnahme der Probenkollektive in Osnabrück, Bielefeld und Oerlinghausen-Helpup ermöglichten Herr SWITALA (Städtische Denkmalpflege Osnabrück), Herr D. LANGE (Hochbauamt der Stadt Bielefeld) und der Architekt Herr G. OBERFELD (Oerlinghausen-Helpup). Herr Dr. K. BOSBACH, der Leiter des Botanischen Gartens in Osnabrück, erlaubte die Entnahme von Proben aus dem Steinbruch im Botanischen Garten. Der Architekt Herr Dipl.-Ing. F.-J. HAPPE (Meschede) diskutierte mit mir ausführlich den Schadensfall der Kirche St. Pankratius in Eslohe-Reiste und ermöglichte die Entnahme eines Probenkollektivs. Bei der Baustein-Entnahme an der Kirche in Eslohe-Reiste unterstützten mich Mitarbeiter der Firma BAUFELD (Essen) sehr.

Die Probenwürfel und die Dünnschliffe erstellten der Präparator Herr E. W. DÖRSCHELN und seine Mitarbeiter, insbesondere Herr R. METZDORF. Bei den Laborarbeiten beriet mich Herr Dipl.-Geol. B. REICHEL. Bei der Arbeit am Rasterelektronenmikroskop unterstützte mich Herr Dr. M. BERTLING. Frau I. REINICKE fertigte die Fotos der Mauerstein-Außenseiten auf Taf. 2-4 an. Die Messung des dynamischen Elastizitäts-Moduls mit dem Impulslaufzeit-Verfahren durfte ich im Laboratorium für Baustoffe der Fachhochschule Münster durchführen.

Für alle erfahrene Hilfe und Unterstützung bin ich herzlich dankbar.

10. Literaturverzeichnis

- ACCARDO, G., & MASSA, S., et al. (1981): Artificial weathering of Carrara marble: relationships between the induced variations of some physical properties. - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, **31** (Part A): 243-273, 11 Abb.; Bologna.
- ADAM, S. (1992): Petrographische und geochemische Untersuchungen zum Verwitterungsverhalten von Molassesandsteinen am Bauwerk - Fallbeispiele: Konstanzer Münster, Alte Kanzlei Überlingen und St. Nikolaus-Kirche Friedrichshafen. - Heidelberg geowiss. Abh., **62**: ix + 174 S., 78 Abb., 14 Tab.; Heidelberg.
- AIGNER, T. (1977): Schalenpflaster im Unteren Hauptmuschelkalk bei Crailsheim (Württ., Trias, mo1) - Stratonomie, Ökologie, Sedimentologie. - N. Jb. Geol. Paläont., Abh., **153** (2): 193-217, 16 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- AIGNER, T. (1982): Calcareous Tempestites: Storm-dominated Stratification in Upper Muschelkalk Limestones (Middle Trias, SW-Germany). - In: EINSELE, G., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Cyclic and Event Stratification: 180-198, 10 Abb.; Berlin (Springer).
- AIGNER, T. (1984): Dynamic stratigraphy of epicontinental carbonates, Upper Muschelkalk (M. Trias), South-German Basin. - N. Jb. Geol. Paläont., Abh., **169** (2): 127-159, 14 Abb.; Stuttgart.
- AIGNER, T. (1985): Storm Depositional Systems. Dynamic Stratigraphy in Modern and Ancient Shallow-Marine Sequences. - Lecture Notes in Earth Sciences, **3**: 174 S., 83 Abb.; Berlin & Heidelberg (Springer).
- AIGNER, T., & BACHMANN, G. H. (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. - Sediment. Geol., **80**: 115-135, 14 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- AIGNER, T., & BACHMANN, G. H. (1993): Sequence Stratigraphy of the German Muschelkalk. - In: HAGDORN, H., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991; Sonderbd. Ges. Naturkde. Württemberg, **2**: 15-18, 2 Abb.; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- AIRES-BARROS, L. (1977): Experiments on thermal fatigue of non-igneous rocks. - Engng. Geol., **11**: 227-238, 8 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- AIRES-BARROS, L., & ALVES, L. M. (1988): Géochimie et genèse des „croûtes noires“ des portails de Jerónimos. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. 2: 699-703, 3 Abb., 4 Tab.; Rotterdam (Balkema).
- AIRES-BARROS, L., & ALVES, L. M., et al. (1990): Weathering and air pollution action on limestones of Jerónimos monastery, Lisbon - Portugal. - Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, **109**: 117-130, 9 Abb.; Coimbra.

- AIRES-BARROS, L.; MAURÍCIO, A. M., & FIGUEIREDO, C. A. (1991): Aplicação do perfilómetro de linhas à alteração e alterabilidade de rochas ornamentais carbonatadas. - *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*, **112**: 67-80, 11 Abb.; Coimbra.
- ALESSANDRINI, G., & BALENCI, P., et al. (1981): Investigation on the degradation of stone: X - Effects of finishing techniques on sandstones and marble. - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: *The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna*, **31** (Part A): 139-164, 12 Abb.; Bologna.
- ALESSANDRINI, G., & BOCCI, A., et al. (1992): Stone materials of Noto (Siracusa) and their decay. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 11-20, 9 Abb.; Lisbon.
- ALFES, C.; BREIT, W., & SCHIESSL, P. (1992): Hardness testing for the measurement of stone degradation. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 771-780, 9 Abb.; Lisbon.
- AMOROSO, G. G., & FASSINA, V. (1983): Stone Decay and Conservation. Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection. - *Materials Sci. Monographs*, **11**: xix + 446 S.; Amsterdam (Elsevier).
- ARNOLD, A., & ZEHNDER, K. (1984): Evaporite und Verwitterung an Bauwerken. - *Eclogae geol. Helv.*, **77** (2): 287-300, 4 Abb.; Basel.
- ARNOULD, M. (1988): Altération bactérienne des pierres calcaires. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: *The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites*; Vol. **2**: 819-823, 3 Abb., 3 Tab.; Rotterdam (Balkema).
- AS-SARURI, M., & LANGBEIN, R. (1990): Dolomitische Gelbkalke des Unteren Muschelkalks (Mittlere Trias) im Thüringer Becken. - *Z. geol. Wiss.*, **18** (11): 1011-1016, 2 Tab., 3 Taf.; Berlin.
- ATTEWELL, P. B., & TAYLOR, D. (1988): Time-dependent atmospheric degradation of building stone in a polluting environment. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: *The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites*; Vol. **2**: 739-753, 10 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- AUBERTIN, M., & LAROCHELLE, F. (1984): Durabilité des granulats: l'essai au sulfate. - *Bull. internat. Assoc. engng. Geol.*, **29**: 335-338; Paris.
- BACHMANN, G. H. (1973): Die karbonatischen Bestandteile des Oberen Muschelkalkes (Mittlere Trias) in Südwest-Deutschland und ihre Diagenese. - *Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart*, N. F. **68**: 1-99, 67 Abb.; Stuttgart.
- BACKHAUS, E., & FLÜGEL, E. (1971): Fazielle und geochemische Untersuchungen am Unteren Muschelkalk des Michelstädter Grabens (Odenwald). - *Notizbl. hess. Landesamt Bodenforsch.*, **99**: 200-213, 2 Abb., 5 Tab., Taf. 15.; Wiesbaden.
- BAUSCH, W. M. (1968): Clay content and calcite crystal size of limestones. - *Sedimentology*, **10**: 71-75, 2 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- BAUSCH, W. M., & POLL, K. G. (1976): Nichtkarbonatische Rückstände von Malmkalen der Ostalpen. - *Geol. Rdsch.*, **65** (2): 579-592, 10 Abb.; Stuttgart.
- BAUSCH, W. M., & POLL, K. G. (1984): Das Profil Loser/Altaussee - Bindeglied zwischen alpinem und süddeutschem Malm. - *Geol. Rdsch.*, **73** (1): 351-369, 14 Abb.; Stuttgart.
- BAZANT, Z. P., et al. (1988): Mathematical Model for Freeze-Thaw Durability of Concrete. - *J. amer. Ceramic Soc.*, **71** (9): 776-783, 5 Abb.; Westerville/Ohio.
- BEEGER, D. (1988): Zur Dokumentation der in Architektur und Plastik verwendeten Gesteinsarten und der auftretenden Verwitterungsformen. - In: AUTORENKOLLEKTIV: *Geologie und Denkmalpflege*; Abh. staatl. Mus. Miner. Geol. Dresden, **35**: 129-134, 4 Abb.; Leipzig.
- BELOYANNIS, N.; THEOULAKIS, P., & HARALAMBIDES, L. (1988a): Stone deterioration at the temple of Apollo Epicourios at Bassai (Peloponnese); hydrophobation tests. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: *Proceedings VIth international congress on deterioration and conservation of stone*: 75-85, 12 Abb.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- BELOYANNIS, N.; THEOULAKIS, P., & HARALAMBIDES, L. (1988b): Causes and mechanism of stone alteration at the temple of Apollo Epicurios at Bassai, Greece. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: *The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites*; Vol. **2**: 763-770; Rotterdam (Balkema).
- BENDER, W., & HÄNDLE, F. (1991): Frostwiderstandsfähigkeit keramischer Baustoffe - Literaturrecherche. - *ZI-Jahrbuch*, **1991**: 86-100; Wiesbaden & Berlin (Bauverlag).
- BINDA, L.; BARONIO, G., & CHAROLA, A. E. (1985): Deterioration of porous materials due to salt crystallization under different thermohygrometric conditions. I. Brick. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: *Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*, Vol. **1**: 279-288, 2 Abb., 2 Tab.; Lausanne.
- BLANC, A.; JATON, C., & ORIAL, G. (1981): Etude des matériaux et des altérations de la façade de Notre-Dame-La-Grande de Poitiers avant restauration. - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: *The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna*, **31** (Part A): 333-354, 13

Abb., 4 Tab., 2 Taf.; Bologna.

- BLASCHKE, R. (1986): Schäden an Baudenkmälern diagnostiziert mittels REM, Polarisationsmikroskop und TEM. - Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., **19**: 333-352, 49 Abb.; Münster.
- BLASCHKE, R. (1988): Vom Realbau des Kalkspats zum mikrobiellen Abbau in Naturstein. - Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., **21**: 279-284, 8 Abb.; Münster.
- BLASCHKE, R. (1989): Typische Verwitterungsprofile von Gesteinsproben im mikroskopischen Bild. - Bautenschutz + Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege (2. Statusseminar des BMFT)“: 26-31, 9 Abb., 1 Tab.; Köln.
- BLASCHKE, R., & JULING, H. (1990): Mobile REM-EDX-Labors für die Denkmalpflege. - Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., **23**: 141-144, 9 Abb.; Berlin.
- BLASCHKE, R., & JULING, H. (1992): Ein Jahr Analytische Baustoffmikroskopie vor Ort (Hilfestellung für Diagnose und Therapie). - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung, 1990 [= Bd. **2**]: 295-315, 9 Taf.; Berlin (Ernst & Sohn).
- BÖKE, H.; CANER-SALTIK, E., & GÖKTÜRK, H. (1992): Gypsum formation on travertines in polluted atmosphere. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 237-246, 4 Abb., 4 Tab.; Lisbon.
- BORTOLASO, G.; LAZZARINI, L.; MENEGAZZO VITTURI, L., & RAMPAZZO, G. (1988): The deterioration of „Rosso Ammonitico Veronese“ nodular limestone: Comparison between a quarry and a Venetian monument. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings VIth international congress on deterioration and conservation of stone: 97-109, 4 Abb., 5 Tab.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- BRAND, U., & VEIZER, J. (1980): Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system-1: trace elements. - J. sediment. Petrol., **50** (4): 1219-1236, 13 Abb.; Lawrence/Kansas.
- BRUCKSCHEN, P. (1992): Zementstratigraphie im Trochitenkalk (Oberer Muschelkalk) des Nordwestdeutschen Berglands. - Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **38**: ix + 241 S., 60 Abb., 10 Tab., 4 Taf.; Bochum.
- BRÜGGERHOFF, S. (1991): Zollern-Institut beim Deutschen Bergbau-Museum: Grundlagen- und praxisorientierte Materialforschung zur Erhaltung von Kulturdenkmälern - ein Statusbericht. - Maßwerk, **1**: 7 Manusk.-S.
- BRÜGGERHOFF, S., & MIRWALD, P. W. (1991): Expositionsversuche mit Naturstein - Studium von Verwitterungsvorgängen an Denkmälern. - Europ. J. Mineral., Beih., **3** (1) [Ber. dtsh. mineral. Ges.]: 46; Stuttgart.
- BRÜGGERHOFF, S., & MIRWALD, P. W. (1992): Examination of complex weathering processes on different stone materials by field exposure studies. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 715-724, 8 Abb., 2 Tab.; Lisbon.
- BRÜGGERHOFF, S.; VISSER, H., & MIRWALD, P. W. (1988): Scheme of a comprehensive diagnosis of stone damage. - 4 S.; Torun. - [Präsentiert auf: VIth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 12.-14.09.1988, Torun (Nicholas Copernicus Univ.)].
- BUSER, W. (1981): Geologie des Lippischen Waldes zwischen Oerlinghausen und Hörste. - Unveröff. Diplomarb., FB Geowiss. Univ. Münster: 139 S., 25 Abb., 4 Tab., 1 Karte; Münster.
- BUTLIN, R. N.; COOKE, R. U.; JAYNES, S. M., & SHARP, A. S. (1985): Research on limestone decay in the United Kingdom. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. **1**: 537-546, 5 Abb., 1 Tab.; Lausanne.
- BUTLIN, R. N., & COOTE, A. T., et al. (1988): A study of the degradation of building materials at Lincoln Cathedral, Lincoln, England. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings VIth international congress on deterioration and conservation of stone: 246-255, 7 Abb.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- BUTLIN, R. N., & COOTE, A. T., et al. (1992): A four-year study of stone decay in different pollution climates in the United Kingdom. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 345-353, 2 Abb., 1 Tab.; Lisbon.
- CAMUFFO, D.; DEL MONTE, M.; SABBIONI, C., & VITTORI, O. (1982): Wetting, deterioration, and visual features of stone surfaces in an urban area. - Atmospheric Environ., **16** (9): 2253-2259, 7 Abb.; Oxford.
- CANER, E. N., & SEELEY, N. J. (1978): Communication 5.3: Minéraux argileux et altération des calcaires. - In: UNESCO/RILEM Colloque international Altération et protection des monuments en pierre, Tome IV: 8-9; Paris.
- CANER, E. N., & TÜRKMEENOGLU, A. G. (1985): Deterioration of basalts from a Hittite archaeological site, Karatepe, Turkey. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. **1**: 411-420, 10 Abb.; Lausanne.
- CANEVA, G.; NUGARI, M. P.; RICCI, S., & SALVADORI, O. (1992): Pitting of marble Roman monuments and the related microflora. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 521-530, 5 Abb., 2 Tab.; Lisbon.
- CASSARO, M. A.; GAURI, K. L.; SHARIFINASSAB, M., & SHARIFIAN, A. (1982): On the Strength and Deformation Proper-

- ties of Indiana Limestone and Concrete in the Presence of Salts. - In: GAURI, K. L., & GWINN, J. A. [Hrsg.]: Fourth International Congress on Deterioration and Preservation of Stone Objects: 57-76, 15 Abb., 6 Tab.; Louisville/Kentucky (Univ. of Louisville).
- CHILINGAR, G. V.; BISSELL, H. J., & WOLF, K. H. (1979): Diagenesis of Carbonate Sediments and Epigenesis (or Catagenesis) of Limestones. - In: LARSEN, G. & CHILINGAR, G. V. [Hrsg.]: Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks; Developments in Sedimentology, **25 A**: 247-422, 17 Abb., 24 Taf.; Amsterdam (Elsevier).
- CHOWDHURY, A. N.; PUNURU, A. R., & GAURI, K. L. (1990): Weathering of Limestone Beds at the Great Sphinx. - Environ. Geol. Water Sci., **15** (3): 217-223, 6 Abb.; New York.
- CHRISTARAS, B. (1991): Durability of building stones and weathering of antiquities in Creta/Greece. - Bull. internat. Assoc. engng. Geol., **44**: 17-25, 4 Abb., 4 Tab.; Paris.
- ČICHOVSKÝ, L. (1990): The role of clay minerals in weathering process of building stones (agressive atmosphere of modern urban agglomerations). - Acta Univ. Carolinae, Geol., **1990** (2): 181-208, 17 Abb.; Praha.
- CLEMENS, K.; GRIMM, W.-D., & POSCHLOD, K. (1990): Zur Kennzeichnung des Korngefüges und des Porenraumes der Naturwerksteine. - In: GRIMM, W.-D. [Hrsg.]: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland; Arbeitsh. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **50**: 65-94, 20 Abb.; München.
- CLOOTH, G.; KLAAR, H. J., & BURCHARD, W.-G. (1988): Präparations- und Abbildungsverfahren von Natursteinproben und deren Einfluß auf die Gefügeanalyse. - In: Sonderbände der praktischen Metallographie, **19**: 141-152, 16 Abb., 5 Tab.
- CRNKOVIC, B., & KRTOLICA, B. (1976): On the Investigation of Stone Quality for the Reconstruction of the Sehitluci Monument near Banja Luka. - 2me Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre: 185-192, 7 Abb., 3 Tab.; Athènes (Chaire de Chimie Physique de l' U.T.N. d'Athènes).
- CUTTANO, M.; MASTRONARDI, P., & ROSSI-MANARESI, R. (1981): Alveolar weathering of the „tuff“ of Matera. Mechanism of deterioration and effectiveness of preservation treatments. - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, 31 (Part A): 355-377, 7 Abb., 6 Tab.; Bologna.
- DAHMER, D.-D., & HILBRECHT, H. (1986): Die Faziesentwicklung des Unteren Muschelkalks bei Bad Hersfeld (Nordhessen) mit Anmerkungen zur Entstehung der Mikrite. - N. Jb. Geol. Paläont., Mh., **1986** (9): 513-528, 3 Abb.; Stuttgart.
- DAPENA, J. E.; GARCIA DEL CURA, A., & ORDOÑEZ, S. (1988): Study of the limestone rock used in the construction of palaces in Madrid during the 18th and 19th centuries. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. **2**: 683-690, 9 Abb., 6 Tab.; Rotterdam (Balkema).
- DEICHSEL, G., & TRAMPISCH, H. J. (1985): Clusteranalyse und Diskriminanzanalyse. - 135 S., 27 Abb., 3 Tab.; Stuttgart (Fischer).
- DELGADO RODRIGUES, J. (1976): Estimation of the Content of Clay Minerals and its Significance in Stone Decay. - 2me Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre: 105-108, 2 Abb., 1 Tab.; Athènes (Chaire de Chimie Physique de l' U.T.N. d'Athènes).
- DELGADO RODRIGUES, J. (1982): Laboratory Study of Thermally-Fissured Rocks. - In: GAURI, K. L., & GWINN, J. A. [Hrsg.]: Fourth International Congress on Deterioration and Preservation of Stone Objects: 281-294, 6 Abb.; Louisville/Kentucky (Univ. of Louisville).
- DELGADO RODRIGUES, J. (1988): Proposed geotechnical classification of carbonate rocks based on Portuguese and Algerian examples. - Engng. Geol., **25**: 33-43, 7 Abb., 1 Tab.; Amsterdam (Elsevier).
- DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.] (1992): Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Portugal, 15-18 June 1992. - xix + 1578 S.; Lisbon (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).
- DELGADO RODRIGUES, J., & ISABEL PRUDÊNCIO, M. (1992): Characteristics and genesis of the calcite deposits of the Jerónimos Monastery, Lisbon, Portugal. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 1383-1391, 6 Abb.; Lisbon.
- DERMENTZOPOULOS, T., & MIMIDES, T., et al. (1988): Building stones of ancient monuments in Attica; an outline. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. **2**: 619-629, 5 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- DEUTLOFF, O.; KÜHN-VELTEN, H., & MICHEL, G. (1986): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 100000. Erläuterungen zu Blatt **C 3914** Bielefeld: 104 S., 19 Abb., 2 Tab.; Krefeld.
- DIN 52100 (7/1939): Prüfung von Naturstein. - 5 S., 2 Taf.; Berlin (Beuth).
- DIN 52100 (11/1990): Teil 2: Naturstein und Gesteinskörnungen. Gesteinskundliche Untersuchungen, Allgemeines und Übersicht. - 5 S., 1 Tab.; Berlin (Beuth).
- DIN 52102 (8/1988): Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität. - 10 S., 2 Abb., 2 Tab.; Berlin (Beuth).
- DIN 52103 (10/1988): Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert. - 4 S., 1 Tab.; Berlin (Beuth).
- DIN 52104 (11/1982): Frost-Tau-Wechsel-Versuch, Verfahren A bis Q. - 6 S., 1 Abb., 2 Tab.; Berlin (Beuth).

- DIN 52106 (11/1972): Beurteilungsgrundlagen für die Verwitterungsbeständigkeit. - 6 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 52111 (3/1990): Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat. - 5 S.; Berlin (Beuth).
- DOE, B. R. (1989): IGC Field Trip T235: A Different View of Stone Monuments, Memorials and Buildings of Washington, District of Columbia. - In: 28th International Geological Congress: Environmental, Engineering, and Urban Geology in the United States, Vol. 1 (T235): 1-9, 4 Abb.; Washington.
- DOLL, K.-H. (1978): Schäden an Naturstein und ihre Beseitigung. - Deutsche Bauz., **26** (12): 1711-1714; Gütersloh.
- DOLL, K.-H. (1979): Schäden an Naturstein und ihre Beseitigung. - Deutsche Bauz., **27** (3): 371-374; Gütersloh. - [Fortsetzung von DOLL (1978)].
- DRAGOVICH, D. (1986): Weathering rates of marble in urban environments, eastern Australia. - Z. Geomorph. N. F., **30** (2): 203-214, 5 Abb., 2 Tab.; Berlin, Stuttgart.
- DRAGOVICH, D. (1987): Measuring Stone Weathering in Cities: Surface Reduction on Marble Monuments. - Environ. Geol. Water Sci., **9** (3): 139-141, 3 Abb., 2 Tab.; New York.
- DRAGOVICH, D. (1991): Marble Weathering in an Industrial environment, Eastern Australia. - Environ. Geol. Water Sci., **17** (2): 127-132, 5 Abb., 1 Tab.; New York.
- DREYER, W. (1974): Materialverhalten anisotroper Festkörper. Thermische und elektrische Eigenschaften. - Appl. Mineral., **7**: 295 S., 121 Abb., Wien & New York.
- DUCHROW, H., & GROETZNER, J. P. (1984): Oberer Muschelkalk. - In: KLASSEN, H. [Hrsg.]: Geologie des Osnabrücker Berglandes: 169-219, 5 Abb.; Osnabrück (Naturwiss. Mus.).
- DÜPPENBECKER, V., & FITZNER, B. (1991): Gesteinseigenschaften und Verwitterungszustand der Monumente auf dem Nemrud Dag. - In: Westfälisches Museum für Archäologie [Hrsg.]: Nemrud Dag - Neue Methoden der Archäologie: 39-47, Abb. 13, Tab. 1-2, Taf. 18-24; Münster (Landschaftsverband Westfalen-Lippe).
- DUTTLINGER, W., & KNÖFEL, D. (1989): Untersuchungen von Natursteinschäden an der Sprudelanlage in Bad Nauheim. - Bautenschutz + Bausanierung, **12** (6): [97]-[104], 15 Abb., 2 Tab.; Köln.
- EBERLI, G. P. (1991): Calcareous Turbidites and Their Relationship to Sea-Level Fluctuations and Tectonism. - In: EINSELE, G.; RICKEN, W., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Cycles and Events in Stratigraphy: 340-359, 12 Abb.; Berlin & Heidelberg (Springer).
- EBERT, A., & MÜLLER, H. (1973): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25000. Erläuterungen zu Blatt **4715** Eslohe: 298 S., 23 Abb., 13 Tab., 5 Taf.; Krefeld.
- EDER, F. W.; ENGEL, W.; FRANKE, W., & SADLER, P. M. (1983): Devonian and Carboniferous Limestone-Turbidites of the Rheinisches Schiefergebirge and Their Tectonic Significance. - In: MARTIN, H., & EDER, F. W. [Hrsg.]: Intracontinental Fold Belts: 93-124, 13 Abb., 2 Taf.; Berlin (Springer).
- EFES, Y. (1980): Bericht über das Forschungsvorhaben „Einfluß der Porosität auf die Korrosion der am Kölner Dom verwendeten Naturbausteine“. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“ (München, 6. u. 7. März 1980): 78-93, 8 Abb.; Erlangen.
- EICKELBERG, U.; HERPPICH, S., & ZALLMANZIG, J. [Hrsg.] (1990): Die Dokumentation in der Bestandsaufnahme - Untersuchung, Bewertung und Restaurierung denkmalpflegerischer Objekte. - Bautenschutz + Bausanierung, Sonderh.: 42 S., 85 Abb.; Köln.
- EINSELE, G. (1982): Limestone-Marl Cycles (Periodites): Diagnosis, Significance, Causes - a Review. - In: EINSELE, G., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Cyclic and Event Stratification: 8-53, 14 Abb.; Berlin (Springer).
- EINSELE, G. (1991): Submarine Mass Flow Deposits and Turbidites. - In: EINSELE, G.; RICKEN, W., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Cycles and Events in Stratigraphy: 313-339, 10 Abb.; Berlin & Heidelberg (Springer).
- EINSELE, G., & SEILACHER, A. (1982): Paleogeographic Significance of Tempestites and Periodites. - In: EINSELE, G., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Cyclic and Event Stratification: 531-536, 2 Abb.; Berlin (Springer).
- ERNST, G., & WACHENDORF, H. (1968): Feinstratigraphisch-fazielle Analyse der „Schaumkalkserie“ des Unteren Muschelkalkes im Elm (Ost-Niedersachsen). - In: BETTENSTEDT, F., & WACHENDORF, H. [Hrsg.]: Gerhard-Keller-Festschrift; Beih. Ber. naturhist. Ges. Hannover, **5**: 165-205, 7 Abb., 2 Tab., 6 Taf.; Hannover.
- ESBERT, R. M., & ORDAZ, J. (1985): Alterabilidad de la piedra monumental de Laspra (Asturias). - Trab. Geol., **15**: 325-331, 4 Abb.; Oviedo.
- ESBERT, R. M.; ORDAZ, J.; ALONSO, F. J., & ALBA, J. M. (1981): Petrographic and physical study of the building stones from Leon Cathedral (Spain). - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, **31** (Part A): 285-298, 10 Abb., 2 Tab.; Bologna.
- ESBERT, R. M.; ORDAZ, J., & SUÁREZ DEL RIO, L. M. (1983): La durabilidad de los materiales calcareos como piedra monumental. - In: Libro Jubilar J. M. RIOS, Contribuciones sobre temas generales, Tomo III: 245-251, 4 Abb.; Madrid (IGME).
- ESBERT, R. M.; VAZQUEZ, M., & ALONSO, F. J. (1988): Petrografía, formas y procesos de alteración desarrollados en las piedras de algunos monumentos de Avilés (Asturias). - Bol. Geol. y Minero, **99** (3): 432-443, 15 Abb.; Madrid.

- FÄHRRAEUS, L. E.; SLATT, R. M., & NOWLAN, G. S. (1974): Origin of carbonate pseudopellets. - J. sediment. Petrol., **44** (1): 27-29, 2 Abb.; Tulsa.
- FALLER, A.; GRIMM, K.; KAROTKE, E., & ALTHAUS, E. (1987): Sanierung der Dreieichen-Kapelle in Baden-Baden: Mineralogische und mikrobiologische Untersuchungen. - In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Jahrbuch 1987 [des SFB 315]: 137-142, 3 Abb., 2 Tab.; Berlin (Ernst & Sohn).
- FALLER, A.; KAROTKE, E., & ALTHAUS, E. (1987): Mineralogische Untersuchungen an der Abtei Neresheim. - In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Jahrbuch 1987 [des SFB 315]: 143-154, 6 Abb., 7 Tab.; Berlin (Ernst & Sohn).
- FALLER, A.; KAROTKE, E., & ALTHAUS, E. (1988): Salzsäuren in Putz und Mauerwerk des ehemaligen Augustiner-Klosters Oberndorf/Neckar. - In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Jahrbuch 1988 [des SFB 315]: 165-172, 5 Abb.; Berlin (Ernst & Sohn).
- FASSINA, V. (1988a): The stone decay of the main portal of Saint Mark's Basilica in relation to natural weathering agents and to air pollution. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings Vith international congress on deterioration and conservation of stone: 276-286, 7 Abb., 2 Tab.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- FASSINA, V. (1988b): Stone decay of Venetian monuments in relation to air pollution. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. 2: 787-796, 11 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- FASSINA, V. (1992): The stone decay of the portal of the Basilica of SS. Giovanni e Paolo in Venice. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 119-128, 8 Abb.; Lisbon.
- FASSINA, V., & CHERIDO, M. (1985): The Nanto stone deterioration and restoration of Loggia Cornaro in Padova. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. 1: 313-324, 10 Abb., 1 Tab.; Lausanne.
- FASSINA, V.; LAZZARINI, L., & BISCONTIN, G. (1976): Effects of Atmospheric Pollutants on the Composition of Black Crusts Deposited on Venetian Marbles and Stones. - 2me Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre: 201-211, 8 Abb., 7 Tab.; Athènes (Chaire de Chimie Physique de l' U.T.N. d'Athènes).
- FEDDEMA, J. J., & MEIERDING, T. C. (1987): Marble weathering and air pollution in Philadelphia. - Atmospheric Environ., **21** (1): 143-157, 14 Abb.; Oxford.
- FELIX, C., & MARAVELAKI, P. (1992): Croûtes noires de génèses différentes sur la pierre d'Istrie à Venise. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 267-276, 4 Abb.; Lisbon.
- FIEGE, K. (1938): Die Epirogenese des Unteren Muschelkalkes in Nordwestdeutschland, 1. Teil. - Zbl. Mineral. Geol. Paläont., Abt. B, **1938**: 143-170; Stuttgart.
- FISCHER, H. (1974): Abkürzungsverzeichnis zum Zitieren von erdwissenschaftlichen Zeitschriften. - 30 S.; Basel.
- FITZNER, B. (1970): Die Prüfung der Frostbeständigkeit von Naturbausteinen. - Diss., Fak. Bergbau u. Hüttenwesen, RWTH Aachen: 228 S., 39 Abb., 9 Taf.; Aachen.
- FITZNER, B. (1988): Untersuchung der Zusammenhänge zwischen dem Hohlraumgefüge von Natursteinen und physikalischen Verwitterungsvorgängen. - Mitt. Ingenieurgeol. u. Hydrogeol., **29**: 217 S., 129 Abb., 15 Tab., 25 Taf.; Aachen.
- FITZNER, B., & HEINRICHS, K. (1993): Verwitterungszustand und petrographische Eigenschaften von Gesteinen an der Kollegiale zu Thann in Frankreich. - „Gemeinsames Erbe gemeinsam erhalten“, 1. Statuskolloquium des Deutsch-Französischen Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmälern: 67-74, 4 Abb., 3 Tab.; Karlsruhe.
- FITZNER, B.; HEINRICHS, K., & KOWNATZKI, R. (1993a): Natursteinbauwerke - Materialanalyse und Schadensdiagnose. - Das Bauzentrum, **1993** (7): 41-48, 5 Abb.
- FITZNER, B.; HEINRICHS, K., & KOWNATZKI, R. (1993b): Verwitterungsverhalten am Bauwerk und petrographische Eigenschaften verschiedener Trias-Sandsteine. - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinerfall-Steinkonservierung 1991 [= Bd. 3]: 3-19, 30 Abb., 2 Tab.; Berlin (Ernst & Sohn).
- FITZNER, B.; HEINRICHS, K., & KOWNATZKI, R. (1995): Verwitterungsformen - Klassifizierung und Kartierung. - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I: 41-88, 92 Abb., 9 Tab.; Berlin (Ernst & Sohn).
- FITZNER, B., & KALDE, M. (1991): Standarduntersuchungen und Verwitterungssimulation - Methoden zur Bestimmung des Verwitterungsverhaltens von Natursteinen bei Frost-Tau-Wechsel- und Salzbeanspruchung. - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Jahresberichte Steinerfall-Steinkonservierung 1989 [= Bd. 1]: 147-158; Berlin.
- FITZNER, B., & KOWNATZKI, R. (1989): Kartierung und empirische Klassifizierung der Verwitterungsformen und Verwitterungsmerkmale von Natursteinen an geschädigten Bauwerkspartien. - Bautenschutz + Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege (2. Statusseminar des BMFT)“: 21-25, 17 Abb.; Köln.
- FITZNER, B., & KOWNATZKI, R. (1991a): Klassifizierung der Verwitterungsformen und Kartierung von Natursteinbauwerken. - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Jahresberichte Steinerfall-Steinkonservierung 1989 [= Bd. 1]: 1-13, 14 Abb.; Berlin.

- FITZNER, B., & KOWNATZKI, R. (1991b): Porositätseigenschaften und Verwitterungsverhalten von sedimentären Naturwerksteinen. - Bauphysik, **13** (4): 111-119, 16 Abb., 5 Tab.; Berlin (W. Ernst & Sohn).
- FITZNER, B., & KOWNATZKI, R. (1995): Rüdersdorfer Schaumkalk als Baumaterial - Porositätseigenschaften und Verwitterungsverhalten der Werksteine des Belvedere auf dem Pfingstberg in Potsdam. - Berliner geowiss. Abh., **A 168**: 323-339, 2 Taf.; Berlin.
- FITZNER, B., & SNETHLAGE, R. (1982): Einfluß der Porenradialverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine. - Bautenschutz + Bausanierung, **5** (3): 97-103, 9 Abb., 5 Tab.; Köln.
- FITZNER, B., & SNETHLAGE, R. (1983): Modellvorstellungen zum Kristallisations- und Hydratationsdruck von Salzen im Porenraum von Sandsteinen. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“ (Hannover, 7. u. 8. März 1983): 6-19, 4 Abb., 4 Tab.; Erlangen.
- FLÜGEL, E. (1978): Mikrofazielle Untersuchungsmethoden von Kalken. - 454 S., 68 Abb., 57 Tab., 33 Taf.; Berlin (Springer).
- FLÜGEL, E. (1982): Microfacies Analysis of Limestones. - 633 S., 78 Abb., 58 Tab., 53 Taf.; Berlin (Springer).
- FLÜGEL, E., & HÖTZL, H. (1971): Foraminiferen, Calcisphaeren und Kalkalgen aus dem Schwelmer Kalk (Givet) von Letmathe im Sauerland. - N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **137** (3): 358-395, 5 Abb., 16 Tab.; Stuttgart.
- FLÜGEL, E., & HÖTZL, H. (1976): Palökologische und statistische Untersuchungen in mitteldevonischen Schelf-Kalken (Schwelmer Kalk, Givet; Rheinisches Schiefergebirge). - Bayerische Akad. Wiss., math.-naturwiss. Kl., Abh., N. F. **156**: 70 S., 29 Abb., 17 Tab.; München.
- FOOKES, P. G.; DEARMAN, W. R., & FRANKLIN, J. A. (1971): Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. - Quart. J. engng. Geol., **4**: 139-185, 21 Abb., 6 Taf.; London.
- FRANK, W. H. (1981): Die Naturwerksteine in der Altstadt von Goslar und ihre Vorkommen in der Umgebung der Stadt. - Clausthaler geol. Abh., **40**: 247 S., 21 Abb., 17 Tab., 26 Taf., 7 Anl.; Clausthal-Zellerfeld.
- FRANK, W. H. (1983): Verwitterungserscheinungen an Bauwerken aus Naturstein, Möglichkeiten der Restaurierung und Konservierung. - Z. dt. geol. Ges., **134** (2): 317-343, 3 Abb., 6 Tab., 3 Taf.; Hannover.
- FRANKE, L., & BENTRUP, H. (1993a): Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln im Hinblick auf lange Lebensdauer, Teil 1. - Ziegelind. internat., **1993** (7-8): 483-492, Abb. 1-10; Wiesbaden & Berlin (Bauverlag).
- FRANKE, L., & BENTRUP, H. (1993b): Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln im Hinblick auf lange Lebensdauer, Teil 2. - Ziegelind. internat., **1993** (9): 528-536, Abb. 11-17; Wiesbaden & Berlin (Bauverlag).
- FRANKE, L.; BENTRUP, H., & SCHUMANN, I. (1993a): Ursachen der Steinschädigung an historischen Backsteinbauten in Norddeutschland, Teil 1. - Bautenschutz + Bausanierung, **16** (2): [13]-[16], Abb. 1-5, Tab. 1-2; Köln.
- FRANKE, L.; BENTRUP, H., & SCHUMANN, I. (1993b): Ursachen der Steinschädigung an historischen Backsteinbauten in Norddeutschland, Teil 2. - Bautenschutz + Bausanierung, **16** (3): [45]-[48], Abb. 6-8, Tab. 3-5; Köln.
- FÜCHTBAUER, H., & RICHTER, D. K. (1988): Karbonatgesteine. - In: FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.]: Sedimente und Sedimentgesteine: 233-434, 158 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart). - [4., neubearb. Aufl.].
- FÜRSICH, F. T. (1974): Ichnogenus *Rhizocorallium*. - Paläont. Z., **48** (1/2): 16-28, 2 Abb., Taf. 4; Stuttgart.
- FÜRST, M., & SANTOWSKI, G. (1985): Natursteine historischer Baudenkmäler Bamberg und seiner Umgebung. - Geol. Bl. NO-Bayern, **34/35**: 563-602, 2 Abb., 2 Tab., Taf. 41-47; Erlangen.
- FURLAN, V., & GIRARDET, F. (1992): Pollution atmosphérique et réactivité des pierres. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 153-161, 9 Abb.; Lisbon.
- GALE, F. R., & WEISS, N. R. (1982): A Study of Examination and Treatment Techniques for a Limestone Gazebo. - In: GAURI, K. L., & GWINN, J. A. [Hrsg.]: Fourth International Congress on Deterioration and Preservation of Stone Objects: 135-145; Louisville/Kentucky (Univ. of Louisville).
- GALLE, A., & FRIÁKOVÁ, O., et al. (1988): Biostratigraphy of Middle and Upper Devonian carbonates of Moravia, Czechoslovakia. - In: McMILLAN, N. J.; EMBRY, A. F., & GLASS, D. J. [Hrsg.]: Devonian of The World; Canadian Soc. Petroleum Geologists, Mem. **14** (Vol. III): 633-645, 1 Abb., Tab. A-E; Calgary.
- GALLI, G. (1993): Temporal and Spatial Patterns in Carbonate Platforms. - Lecture Notes in Earth Sciences, **46**: 325 S., 171 Abb.; Berlin & Heidelberg (Springer).
- GAUGLITZ, E. (1967): Zur Stratigraphie und Fazies des Flinz im nordöstlichen Sauerland. - Diss., Math.-Naturwiss. Fak. Univ. Göttingen: 63 S., 20 Abb.; Göttingen.
- GAURI, K. L. (1990): Decay and Preservation of Stone in Modern Environments. - Environ. Geol. Water Sci., **15** (1): 45-54, 5 Abb.; New York.
- GAURI, K. L.; CHOWDHURY, A. N., et al. (1988): Geologic features and the durability of limestones at the Sphinx. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. **2**: 723-729, 4 Abb., 2 Tab.; Rotterdam (Balkema).
- GAURI, K. L.; TAMBE, S. S., & CANER-SALTIK, E. N. (1992): Weathering of Dolomite in Industrial Environments. - Environ. Geol. Water Sci., **19** (1): 55-63, 10 Abb.; New York.

- GÉLINAS, C., & ANGERS, R. (1986): Improvement of the Dynamic Water-Expulsion Method for Pore Size Distribution Measurements. - Amer. Ceramic Soc. Bull., **65** (9): 1297-1300, 6 Abb., 1 Tab.; Columbus/Ohio.
- GEMBAL, J. (1985): The capability of ultrasonic method for fine art stone object investigation. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. 1: 49-53, 4 Abb.; Lausanne.
- GERARD, R. (1985): Détermination de la durabilité au gel par une méthode de capillarité. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. 1: 157-166, 3 Abb., 1 Tab.; Lausanne.
- GÖTZ, A. E. (1994): Feinstratigraphie und Zyklengliederung im Unteren Muschelkalk (Raum Creuzburg - Westthüringen). - Beitr. Geol. Thüringen, n. F. **1**: 3-12, 3 Abb.; Jena.
- GORALCZYK, P.; BEEGER, D., & MATERNA, H. (1988): Zur Verwitterung und Konservierung von Skulpturen aus Carrara-Marmor (Schloßbrückenskulpturen und Humboldt-Denkmal in Berlin). - In: AUTORENKOLLEKTIV: Geologie und Denkmalpflege; Abh. staatl. Mus. Miner. Geol. Dresden, **35**: 47-59, 10 Abb., 2 Tab.; Leipzig.
- GORETZKI, L.; FÜTING, M., & KÖHLER, W. (1987): Untersuchungen zur Korrosion der Marmorskulpturen im Park von Potsdam-Sanssouci. - Bautenschutz + Bausanierung, **10** (3): [104]-[109], 12 Abb.; Köln.
- GORETZKI, L.; SEIDEL, G., & STEINER, W. (1987): Zur Verwitterung von Karbonatsteinen und Sandsteinen an Bauwerken. - Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauw. Weimar, Reihe B, **33** (2): 70-74, 4 Abb., 14 Tab.; Weimar.
- GRASSEGGGER, G. (1992): Moderne Entwicklungen zur Kennzeichnung von Naturwerksteinen. - Die Geowissenschaften, **10** (9-10): 270-273, 2 Abb., 1 Tab.; Weinheim.
- GRIMM, W.-D. (1983): Zum Verwitterungsverhalten von Naturwerksteinen in München. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“ (Hannover, 7. u. 8. März 1983): 41-53; Erlangen.
- GRIMM, W.-D. (1984a): Geologie der roten Jurakalksteine („Rotmarmor“) vom Typ der Knollenkalksteine (Adneter Knollenkalk bzw. Ammonitico-Rosso-Kalkstein) und der Hierlatzkalksteine im alpinen und mediterranen Raum. - In: GRIMM, W.-D., & SNETHLAGE, R.: Adneter Rotmarmor. Vorkommen und Konservierung; Arbeitsh. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **25**: 7-26, Abb. 1-17; München.
- GRIMM, W.-D. (1984b): Zur Verwitterung von Naturwerksteinen insbesondere bayerischer Provenienz. - Geologica Bavarica, **86**: 507-550; München.
- GRIMM, W.-D. (1986a): Verwitterungserscheinungen und Schadensprogression an Denkmalgesteinen deutscher Friedhöfe - Überblick über ein Forschungsprojekt. - In: WITTMANN, F. H. [Hrsg.]: Berichtsband des 2. internationalen Kolloquiums Werkstoffwissenschaften und Bausanierung: 433-436; Esslingen (Technische Akademie).
- GRIMM, W.-D. (1986b): Zur Verwitterung von Denkmalgesteinen auf Friedhöfen der Bundesrepublik Deutschland. - Bautenschutz + Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege (1. Statusseminar des BMFT)“: 56-60, 11 Abb.; Köln.
- GRIMM, W.-D. [Hrsg.] (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. - Arbeitsh. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **50**: 255 pag. S., 400 unpag. S., 200 Taf.; München.
- GRIMM, W.-D. (1992): Naturwerksteine und Denkmalgesteine. - Die Geowissenschaften, **10** (9-10): 251-256, 8 Abb.; Weinheim.
- GRIMM, W.-D., & VÖLKL, J. (1983): Rauigkeitsmessungen zur Kennzeichnung der Naturwerksteinverwitterung. - Z. dtsh. geol. Ges., **134** (2): 387-411, 11 Abb.; Hannover.
- GROBE, J.; STOPPEK-LANGNER, K.; MÜLLER-WARMUTH, W.; THOMAS, S.; BENNINGHOVEN, A., & HAGENHOFF, B. (1993): Grundlagenforschung im Dienst des Bautenschutzes. - Nachr. Chem. Tech. Lab., **41** (11): 1233-1240, 9 Abb., 1 Tab.; Weinheim (VCH).
- GROETZNER, J. P. (1984): Unterer und Mittlerer Muschelkalk. - In: KLASSEN, H. [Hrsg.]: Geologie des Osnabrücker Berglandes: 153-168, 5 Abb.; Osnabrück (Naturwiss. Mus.).
- GRUBER, A. (1933): Bohrorganismen im oberen Muschelkalk. - Geol. Rdsch., **23a** [Salomon-Calvi-Festschrift]: 263-266, 3 Abb.; Berlin.
- GRUNERT, S. (1978): Bericht über einen Langzeitversuch zur Verwitterung von Sandsteinwerksteinen an Bauwerken. - Abh. staatl. Mus. Miner. Geol. Dresden, **27**: 63-89, 3 Abb., 7 Tab., 5 Taf.; Dresden.
- GUERRERO, M. A., & VALE, J., et al. (1988): Hygric behaviour and alterability of limestones as selection criteria for reposition. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings Vth international congress on deterioration and conservation of stone: 293-302, 4 Abb., 1 Tab.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- GWOSDZ, W. (1972): Stratigraphie, Fazies und Paläogeographie des Oberdevons und Unterkarbons im Bereich des Attendorn-Eisper Riffkomplexes (Sauerland, Rheinisches Schiefergebirge). - Geol. Jb., **A 2**: 71 S., 23 Abb., 5 Tab., 1 Taf.; Hannover.
- HAAGENRUD, S. E., & DAHLIN, E. (1994): Conservation, restoration and maintenance of Europe's Cultural Heritage and Building Stock. - In: Alfred-Wegener-Stiftung [Hrsg.]: Die benutzte Erde: 265-273, 5 Abb., 1 Tab.; Berlin (Ernst & Sohn).
- HAGDORN, H. (1978): Muschel/Krinoiden-Bioherme im Oberen Muschelkalk (mo1, Anis) von Crailsheim und Schwäbisch

- Hall (Südwestdeutschland). - N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **156** (1): 31-86, 25 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- HAGDORN, H. [Hrsg.] (1991): Muschelkalk - A Field Guide. - 80 S., 78 Abb.; Korb (Goldschneck).
- HAGDORN, H.; HORN, M., & SIMON, T. (1993): Vorschläge für eine lithostratigraphische Gliederung und Nomenklatur des Muschelkalks in Deutschland. - In: HAGDORN, H., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991; Sonderbd. Ges. Naturkde. Württemberg, **2**: 39-46, 1 Tab.; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- HAMMECKER, G., & JEANNETTE, D. (1988): Role des proprietes physiques dans l'alteration de roches carbonates: Exemple de la façade ouest de Notre-Dame-La Grande de Poitiers (France). - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings Vth international congress on deterioration and conservation of stone: 266-275, 7 Abb.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- HARVEY, R. D.; BAXTER, J. W.; FRASER, G. S., & SMITH, C. B. (1978): Absorption and other properties of carbonate rock affecting soundness of aggregate. - In: WINKLER, E. M. [Hrsg.]: Decay and Preservation of Stone; Geol. Soc. Amer., Engng. Geol. Case Hist., **11**: 7-16, 3 Abb., 5 Tab.; Boulder/Colorado.
- HARVEY, R. D.; FRASER, G. S., & BAXTER, J. W. (1974): Properties of carbonate rocks affecting soundness of aggregate - A progress report. - Illinois Miner. Note, **54**: 20 S., 10 Abb., 6 Tab.; Urbana (Illinois State Geol. Surv.).
- HAUCK, M. (1992): Verwendung, Verwitterung und Restaurierung von Naturwerksteinen am Passauer Dom. - Die Geowissenschaften, **10** (9-10): 281-282, 2 Abb.; Weinheim.
- HELING, D. (1988): Ton- und Siltsteine. - In: FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.]: Sedimente und Sedimentgesteine: 185-231, 19 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart). - [4., neubearb. Aufl.].
- HERBIG, H.-G., & BENDER, P. (1992): A Eustatically Driven Calcliturbidite Sequence from the Dinantian II of the Eastern Rheinisches Schiefergebirge. - Facies, **27**: 245-262, 8 Abb., Taf. 50-51; Erlangen.
- HERRERO, J. I. (1967): Altération des calcaires et des grès utilisés dans la construction. - Trav. et Publ., **7**: 128 S., 32 Abb.; Paris (Eyrolles).
- HESSE, R. (1991): Untersuchungen an einem monotypischen Fund von *Encrinurus liliiformis* aus dem Oberen Muschelkalk bei Bad Driburg. - Geol. Paläont. Westfalen, **19**: 7-46, 21 Abb., 3 Tab. 4 Taf.; Münster (Landschaftsverband Westfalen-Lippe).
- HILBERT, G. (1991): Der Zusammenhang zwischen Verwitterungsverhalten und gesteinspezifischen Parametern des Soester Grünsandsteins (Turon) im südlichen Münsterland (Westfalen). - Diss., FB Geowiss. Univ. Münster: iii + 156 S., Münster.
- HIRSCHWALD, J. (1911-1912): Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. - 923 S., 7 Taf.; Berlin (Borntraeger).
- HLADIL, J. (1986): Trends in the Development and Cyclic Patterns of Middle and Upper Devonian Buildups. - Facies, **15**: 1-34, 9 Abb., 1 Tab., Taf. 1-9; Erlangen.
- HLADIL, J. (1988): Structure and microfacies of Middle and Upper Devonian carbonate buildups in Moravia, Czechoslovakia. - In: McMILLAN, N. J.; EMBRY, A. F., & GLASS, D. J. [Hrsg.]: Devonian of The World; Canadian Soc. Petroleum Geologists, Mem. **14** (Vol. II): 607-618, 4 Abb., 1 Tab., 2 Taf.; Calgary.
- HLADIL, J. (1994a): Mikrofacie devonských vápenců na Moravě (Část I. - Klasifikační přístupy). - Zemní plyn a nafta, **38** (4): 291-335, 4 Abb., 8 Taf.; Hodonín.
- HLADIL, J. (1994b): Mikrofacie devonských vápenců na Moravě (Část II. - Přehled mikrofacií). - Zemní plyn a nafta, **39** (12): 19-71, 2 Abb., 14 Taf.; Hodonín.
- HOFMEISTER, E.; SIMON, P., & STEIN, V. (1972): Blei und Zink im Trochitenkalk (Trias, Oberer Muschelkalk 1) Nordwest-Deutschlands. - Geol. Jb., **D 1**: 103 S., 20 Abb., 10 Tab., 4 Taf.; Hannover.
- HONEYBORNE, D. B., & HARRIS, P. B. (1958): The structure of porous building stone and its relation to weathering behaviour. - In: EVERETT, D. H., & STONE, F. S. [Hrsg.]: The Structure and Properties of Porous Materials; Proc. Tenth Symp. Colston Res. Soc.: 343-365, 12 Abb.; London (Butterworths).
- HOSEK, J., & SKUPIN, L. (1978): Sanierung des Plänermauerwerkes der Teinkirche in Prag. - Dtsch. Kunst u. Denkmalpflege, **36**: 107-126, 17 Abb., 6 Tab.; München, Berlin.
- HOUPT, R.; KONOMI, N., & TISOT, J. P. (1978): Structure, proprietes physiques et comportement mecanique des roches calcaires. - In: 3rd internat. Congr. engng. Geol., Madrid, Sept. 1978: 191-199, 10 Abb.; Madrid. - [Rep. III/19].
- HUDEC, P. P. (1978a): Standard engineering tests for aggregate: What do they actually measure? - In: WINKLER, E. M. [Hrsg.]: Decay and Preservation of Stone; Geol. Soc. Amer., Engng. Geol. Case Hist., **11**: 3-6, 11 Abb.; Boulder/Colorado.
- HUDEC, P. P. (1978b) Rock weathering on the molecular level. - In: WINKLER, E. M. [Hrsg.]: Decay and Preservation of Stone; Geol. Soc. Amer., Engng. Geol. Case Hist., **11**: 47-51, 4 Tab.; Boulder/Colorado.
- HUDEC, P. P. (1980): Durability of Carbonate Rocks as Function of Their Thermal Expansion, Water Sorption, and Mineralogy. - In: SEREDA, P. J., & LITVAN, G. G. [Hrsg.]: Durability of Building Materials and Components; ASTM spec. tech. Publ., **691**: 497-508, 10 Abb.; Baltimore.
- HÜSSNER, H. (1993): Riffotypen im Muschelkalk Süddeutschlands. - In: HAGDORN, H., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991; Sonderbd. Ges. Naturkde. Württemberg, **2**: 261-269, 4 Abb.; Stuttgart, Korb

(Goldschneck).

- IMEYER, F. (1953): Geologischer Gang durch die geschichtlichen Baudenkmäler der Stadt Osnabrück. - Jber. naturwiss. Ver. Osnabrück, **26**: 23-27, 119-125; Osnabrück.
- IRWIN, M. L. (1965): General theory of epeiric clear water sedimentation. - Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., **49** (4): 445-459, 12 Abb.; Tulsa.
- ISAACSON, P. E., & GALLE, A. (1991): Significance of Amphipora floatstones within the Lažánky Limestone (Late Givetian), Moravian Karst. - Věstník Ústřed. ústavu geol. **66** (5): 275-285, 5 Abb., 2 Taf.; Praha.
- JABLOŇSKA-SZYSZKO, M., & RUDNICKA, B. (1988): Study of the reasons for the destruction of the antique building stone in Palmyra. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings Vth international congress on deterioration and conservation of stone: 207-215, 4 Abb., 2 Tab.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- JAMES, A. N. (1981): Solution parameters of carbonate rocks. - Bull. internat. Assoc. engng. Geol., **24**: 19-25, 5 Abb.; Aachen & Essen.
- JAMES, N. P. (1984): Shallowing-Upward Sequences in Carbonates. - In: WALKER, R. G. [Hrsg.]: Facies Models, Second Edition; Geoscience Canada, Repr. Ser., **1**: 213-228, 19 Abb.; Toronto (Geol. Assoc. Canada).
- JAYNES, S. M., & COOKE, R. U. (1987): Stone weathering in southeast England. - Atmospheric Environ., **21** (7): 1601-1622, 9 Abb., 23 Tab.; Oxford.
- KAEVER, M. (1988): Die Mikrofazies als ein möglicher Indikator für die Verwitterungsresistenz von Karbonatgesteinen. - In: Dokumentationsband zum Umweltforschungskolloquium am 13. Februar 1988, Westfälische Wilhelms-Universität Münster: 58; Münster.
- KATZSCHMANN, L. (1989): Vorkommen, Verwitterung und Beständigkeit von Naturwerkstein in den Innenstadtbereichen der Kreisstädte des Bezirkes Erfurt. - HAB Dissertationen, **17**: 160 S., 28 Abb., 23 Tab., 46 Karten, 5 Anl.; Weimar. - [Weimar, Hochschule f. Architektur u. Bauwesen, Sektion Baustoffverfahrenstechnik, Diss. A].
- KERTÉSZ, P. (1988): Decay and conservation of Hungarian building stones. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. **2**: 755-761, 6 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- KESSLER, F.-J. (1960): Verwitterungserscheinungen an Bauwerken und Bausteinen (Eine Untersuchung der bei Verwitterung an Bunt- und Keupersandsteinen auftretenden Probleme). - Diss. naturwiss. Fak. Univ. Würzburg, Kurzf.: 6 S.; Würzburg.
- KETTELHACK, C. (1988): Mikrofazies des Baumberger Sandsteins und deren Einfluß auf Verwitterungserscheinungen untersucht an der Heilig-Kreuz-Kirche in Münster/Westf. - Unveröff. Diplomarb., FB Geowiss. Univ. Münster: v + 69 S., 33 Abb., 4 Tab., 13 Anl.; Münster.
- KETTELHACK, C. (1992): Mikrofazies des Altenberger Steins und des Baumberger Sandsteins sowie ihre Verwitterungserscheinungen dokumentiert an zwei historischen Baudenkmälern in Münster/Westf. - Diss., FB Geowiss. Univ. Münster: v + 103 S., 49 Abb., 2 Taf., 11 Anl.; Münster.
- KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten. Ihre Ursachen und ihre Abwehr. - 346 S., 291 Abb., 13 Tab.; Leipzig & Wien (Deuticke).
- KIESLINGER, A. (1949): Die Steine von St. Stephan. - 486 S., 207 Abb.; Wien.
- KIESOW, G. et al. (1987): Naturwerkstein in der Denkmalpflege. Handbuch für den Steinmetzen und Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger. - 1012 S.; Ulm (Ebner Verlag).
- KLEMM, D. D. (1980): Gedanken zum Stand der Kalksteinkonservierung. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“ (München, 6. u. 7. März 1980): 126-138; Erlangen.
- KLEMM, D. D.; SCHUH, H., & SNETHLAGE, R. (1987): Verwitterung von Sandsteinen an Gebäuden. - Fortschr. Miner., Beih., **65** (1): 94; Stuttgart.
- KLOTZ, W. (1990): Zyklische Gliederung des Unteren Muschelkalks („Wellenkalk“) auf der Basis von Sedimentations-Diskontinuitäten. - Zbl. Geol. Paläont. Teil I, **1989** (9/10): 1359-1367, 1 Abb., 2 Taf.; Stuttgart.
- KLOTZ, W. (1992): Zyklizität, Fazies und Genese des Unteren Muschelkalks in Südosthessen und Mainfranken. - Diss., Fachbereich 11 Geowiss. u. Geogr., TH Darmstadt: 411 S., 50 Abb.; Darmstadt.
- KLOTZ, W., & LUKAS, V. (1988): Muschel/Crinoiden-Bioherme im Unteren Muschelkalk Südosthessens. - In: RICHTER, D. K. [Hrsg.]: 3. Treffen deutschsprachiger Sedimentologen 23.-26. Mai 1988 in Bochum; Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **29**: 88; Bochum.
- KLUGT, L. J. A. R. VAN DER (1993): Technologische Einflüsse auf die Frostempfindlichkeit keramischer Baustoffe. - ZI-Jahrbuch, **1993**: 24-33, 13 Abb.; Wiesbaden & Berlin (Bauverlag).
- KNÖFEL, D. (1980): Ursachen der Natursteinverwitterung - Natursteinschäden an Bauwerken. Teil II. - Bautenschutz + Bausanierung, **3** (3): 96-103, Abb. 3-23; Köln.
- KNÖFEL, D., & SCHUBERT, P. (1990): Zur Beurteilung von Mörteln für die Instandsetzung von Mauerwerk, Teil I. - Bautenschutz + Bausanierung, **13** (1): [10]-[14], 5 Abb., 3 Tab.; Köln.
- KOCH-FRÜCHTL, U., & FRÜCHTL, M. (1993): Stratigraphie und Faziesanalyse einer mitteldeutschen Karbonatabfolge

- im Remscheid-Altenaer Sattel (Sauerland). - Geol. Paläont. Westfalen, **26**: 47-75, 13 Abb., 4 Taf.; Münster (Landschaftsverband Westfalen-Lippe).
- KÖHLER, W. (1988): Preservation problems of Carrara marble sculptures Potsdam-Sanssouci („radical structural destruction“ of Carrara marble). - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings Vth international congress on deterioration and conservation of stone: 653-662, 9 Abb.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- KONTA, J. (1984): Die Verwitterung der Bau- und Bildhauersteine an historischen Baudenkmälern. - Acta Univ. Carolinae, Geol., **1984** (2): 137-165, 14 Abb.; Praha.
- KRANZ, J. R. (1976): Strontium - ein Fazies-Diagenese-Indikator im Oberen Wettersteinkalk (Mittel-Trias) der Ostalpen. - Geol. Rdsch., **65**: 593-615, 9 Abb.; Stuttgart.
- KRAUS, K. (1985): Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Naturbausteine des Kölner Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk. - Diss., Math.-Naturwiss. Fak. Univ. Köln: 193 S., 53 Abb., 46 Tab.; Köln.
- KRAUS, K. (1988): Verwitterung von Naturwerksteinen. Stand des Wissens und offene Fragen. - Bautenschutz + Bausanierung, **11** (5): [143]-[149], 5 Abb., 2 Tab.; Köln.
- KREBS, W. (1974): Devonian Carbonate Complexes of Central Europe. - In: LAPORTE, L. F. [Hrsg.]: Reefs in Time and Space; Soc. econ. Paleontologists Mineralogists, Spec. Publ., **18**: 155-208, 25 Abb., 9 Tab.; Tulsa/Oklahoma.
- KRULL, I. (1990): Darstellung von di- und trifunktionellen Silylestern und die Anwendung als Steinschutzmittel. - Unveröff. Diplomarb., FB 17 Anorg. Chem., Univ. Münster: 85 S.; Münster.
- KRUMBEIN, W. E., & BRAAMS, J., et al. (1991): Biologische Verwitterung von Bausteinen, mikrobielle Veränderungen der Wirksamkeit von Hydrophobierungsmitteln und Restaurierungsversuche an mit Gips- und Schmutzkrusten belegtem Gesteinsmaterial. - In: BOUÉ, A., et al. (1991): Denkmalpflege und Naturwissenschaft im Gespräch (Workshop in Fulda am 6./7. März 1990): 77-81 + 194-197, Taf. 01-04; Fulda.
- KRUMBEIN, W. E., & SCHÖNBORN-KRUMBEIN, C. E. (1987a): Biogene Bauschäden: Anamnese, Diagnose und Therapie in Bautenschutz und Denkmalpflege. - Bautenschutz + Bausanierung, **10** (1): [14]-[23], Abb. 1-26; Köln.
- KRUMBEIN, W. E., & SCHÖNBORN-KRUMBEIN, C. E. (1987b): Biogene Bauschäden: Anamnese, Diagnose und Therapie in Bautenschutz und Denkmalpflege. - Bautenschutz + Bausanierung, **10** (3): [110]-[117], Abb. 27-38; Köln. - [Fortsetzung von KRUMBEIN & SCHÖNBORN-KRUMBEIN (1987a)].
- KRUMBEIN, W. E., & WARSCHIED, T. (1992): Patina - ein schillernder Begriff. - Die Geowissenschaften, **10** (9-10): 274-276, 2 Abb.; Weinheim.
- KRUMML, F. (1980): Influence of Changes in Temperature on Properties of Cellular Concretes. - In: SEREDA, P. J., & LITVAN, G. G. [Hrsg.]: Durability of Building Materials and Components; ASTM spec. tech. Publ., **691**: 577-583, 3 Abb., 2 Tab.; Baltimore.
- KRUS, M., & KIESSL, K. (1991): NMR-Messung kapillarer Flüssigkeitsbewegungen in porösen Gesteinen und Ableitung neuer Kapillartransport-Kenngrößen. - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1989 [= Bd. 1]: 39-45, 8 Abb.; Berlin (Ernst & Sohn).
- KUDERMANN, G., & BLAUFUSS, K.-H. (1984): Einsatzmöglichkeiten der ICP-AES in der Aluminiumindustrie. - In: WELZ, B. [Hrsg.]: Fortschritte in der atomspektrometrischen Spurenanalytik, Bd. 1: 211-219, 1 Abb.; Weinheim.
- KÜNZEL, H. (1990a): Überlegungen zur Gesteinsverwitterung (Teil 1). - Bautenschutz + Bausanierung, **13** (4): [62]-[64], Abb. 1-4; Köln.
- KÜNZEL, H. (1990b): Überlegungen zur Gesteinsverwitterung (Teil 2). - Bautenschutz + Bausanierung, **13** (5): [84]-[87], Abb. 5-12; Köln.
- KUKAL, Z.; MALINA, J.; MALINOVÁ, R., & TESAROVÁ, H. (1989): man & stone. - 315 S., 222 Abb.; Prague (Geological Survey).
- KUPPER, M. (1975): Recherches en Belgique sur l'altération des pierres calcaires exposées à l'air libre. - Lithoclastia, **2**: 9-18; Boulogne.
- KUPPER, M., & PISSART, A. (1974): Vitesse d'érosion en Belgique de calcaires d'âge primaire exposés à l'air libre ou soumis à l'action de l'eau courante. - In: POSER, H. [Hrsg.]: Geomorphologische Prozesse und Prozeßkombinationen in der Gegenwart unter verschiedenen Klimabedingungen; Abh. Akad. Wiss. Göttingen, math.-naturwiss. Kl., 3. Folge, **29**: 39-50, 6 Abb.; Göttingen.
- LANG, H. D.; RABIEN, A.; STRUVE, W., & WIEGEL, E. (1976): Richtlinien für die Verfasser geowissenschaftlicher Veröffentlichungen. - 36 S.; Hannover.
- LANGER, A. (1989): Lithostratigraphische, technologische und geochemische Untersuchungen im Muschelkalk des Osnaabrücker Berglandes. - Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, **29**: 114 S., 16 Abb., 22 Tab., 5 Taf.; Hannover.
- LAUTRIDOU, J.-P., & OZOUF, J.-C. (1978): Communication 3.3: Relations entre la gélivité et les propriétés physiques (porosité, ascension capillaire) des roches calcaires. - In: UNESCO/RILEM Colloque international Altération et protection des monuments en pierre, Tome IV: 10-14; Paris.
- LAZZARINI, L., & BEGOLLI, R. (1976): Frequency, Forms and Causes of Deterioration of Greek Marbles and Stones in Venice. - 2me Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre: 249-256, 7 Abb.; Athènes (Chaire de Chimie Physique de l' U.T.N. d'Athènes).

- LEARY, E. (1981): A preliminary assessment of capillarity tests as indicators of the durability of British limestones. - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: *The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna*, **31** (Part A): 73-90, 8 Abb., 2 Tab.; Bologna.
- LEWIN, S. Z., & CHAROLA, A. E. (1978): Scanning electron microscopy in the diagnosis of „diseased“ stone. - *Scanning Electron Microscopy*, **1**: 695-702, 15 Abb.; Chicago.
- LEWIN, S. Z., & CHAROLA, A. E. (1981): Stone decay due to foreign inclusions. - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: *The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna*, **31** (Part A): 205-217, 8 Abb.; Bologna.
- LEWRY, A. J.; BIGLAND, D. J., & BUTLIN R. N. (1992): A chamber study of the effects of sulphur dioxide on calcareous stone. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 641-650, 6 Abb.; Lisbon.
- LINDHOLM, R. C., & FINKELMAN, R. B. (1972): Calcite staining: Semiquantitative determination of ferrous iron. - *J. sediment. Petrol.*, **42**: 239-242, 1 Abb., 1 Tab.; Tulsa.
- LIPFERT, F. W. (1989): Air Pollution and Materials Damage. - In: HUTZINGER, O. [Hrsg.]: *Air Pollution; The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol. **4 B**: 113-186, 10 Tab.; Berlin (Springer).
- LITVAN, G. G. (1980): Freeze-Thaw Durability of Porous Building Materials. - In: SEREDA, P. J., & LITVAN, G. G. [Hrsg.]: *Durability of Building Materials and Components; ASTM spec. tech. Publ.*, **691**: 455-463, 1 Abb.; Baltimore.
- LIVINGSTON, R. A. (1985): The role of nitrogen oxides in the deterioration of carbonate stone. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: *Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*, Vol. **1**: 509-516, 1 Tab.; Lausanne.
- LIVINGSTON, R. A. (1988): The application of petrology to the prediction of stone durability. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: *Proceedings Vith international congress on deterioration and conservation of stone*: 432-445; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- LIVINGSTON, R. A. (1992): Graphical methods for examining the effects of acid rain and sulfur dioxide on carbonate stones. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 375-386, 13 Abb.; Lisbon.
- LOEBLICH, A. R., & TAPPAN, H. (1988): *Foraminiferal Genera and Their Classification*. - x + 930 S., 847 Taf.; New York (Van Nostrand Reinhold).
- LUKAS, R. (1990): Die Naturwerksteine Baden-Württembergs und ihre Wetterbeständigkeit sowie Verwitterungsprofile ausgewählter Carbonatgesteine. - Diss., Fak. f. Geowiss. Univ. München: 220 S., 136 Abb.; München.
- LUKAS, R. (1991): Bauphysikalische Eigenschaftsprofile verwitterter Muschelkalk-Gesteine. - *Bauphysik*, **13** (4): 97-105, 8 Abb.; Berlin (Ernst & Sohn).
- LUKAS, V. (1988): Die Terebratel-Bänke (Unterer Muschelkalk, Trias) Hessens - Sedimentologie und Paläogeographie. - In: RICHTER, D. K. [Hrsg.]: *3. Treffen deutschsprachiger Sedimentologen 23.-26. Mai 1988 in Bochum*; Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **29**: 117-120, 2 Abb., 1 Tab.; Bochum.
- LUKAS, V. (1991): Die Terebratel-Bänke (Unterer Muschelkalk, Trias) in Hessen - ein Abbild kurzzeitiger Faziesänderungen im westlichen Germanischen Becken. - *Geol. Jb. Hessen*, **119**: 119-175, 11 Abb., 1 Tab., 3 Taf.; Wiesbaden.
- LUKAS, V. (1992): Zur Diagenese der Karbonate des Unteren Muschelkalk (Trias). - *N. Jb. Geol. Paläont., Abh.*, **185** (1): 85-113, 11 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- LUKAS, V., & WENZEL, B. (1988): Gelbkalke des Unteren Muschelkalks (Trias) - Sabkha oder Subtidal? - In: RICHTER, D. K. [Hrsg.]: *3. Treffen deutschsprachiger Sedimentologen 23.-26. Mai 1988 in Bochum*; Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **29**: 121-124, 2 Abb.; Bochum.
- LUTHER, D. (1982): Geologie der Osning-Achse und der Berlebecker Achse südlich von Horn-Bad Meinberg. - *Münster. Forsch. Geol. Paläont.*, **55**: 75-93, 2 Abb., 1 Tab.; Münster.
- MACHEL, H.-G. (1990): Faziesinterpretation des Briloner Riffs mit Hilfe eines Faziesmodells für devonische Riffkarbonate. - *Geol. Jb.*, **D 95**: 43-83, 5 Abb., 6 Taf.; Hannover.
- MACHEL, H.-G., & HUNTER, I. G. (1994): Facies Models for Middle to Late Devonian Shallow-marine Carbonates, with Comparisons to Modern Reefs: a Guide for Facies Analysis. - *Facies*, **30**: 155-176, 5 Abb., Taf. 30-36; Erlangen.
- MAMET, B., & PREAT, A. (1987): Algues givésiennes du bord sud du Bassin de Dinant et des régions limitrophes. - *Ann. Soc. géol. Belg.*, **109** [1986]: 431-454, 8 Abb.; Liege.
- MAMET, B., & ROUX, A. (1983): Algues dévono-carbonifères de l'Australie. - *Rev. Micropaléont.*, **26** (2): 63-131, 5 Abb., 16 Taf.; Paris.
- MAMET, B.; ROUX, A.; LAPOINTE, M., & GAUTHIER, L. (1992): Algues ordoviciennes et siluriennes de l'île d'Anticosti (Québec, Canada). - *Rev. Micropaléont.*, **35** (3): 211-248, 1 Abb., 12 Taf.; Paris.
- MAMILLAN, M. (1988): Methodes d'évaluation des dégradations des monuments en pierre. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: *Proceedings Vith international congress on deterioration and conservation of stone*: 456-465, 2 Abb.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).

- MARAVELAKI, P., & BISCONTIN, G., et al. (1992): Evaluation of deterioration processes on the Istria Stone of Venetian monuments. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 163-173, 8 Abb., 3 Tab.; Lisbon.
- MARUSIN, S. L. (1983): Interior Fissures and Microstructure of Shale Brick. - Amer. Ceramic Soc. Bull., **62** (11): 1264-1268, 18 Abb., 1 Tab.; Columbus/Ohio.
- MARUSIN, S. L. (1985): Water Absorption, Interior Fissures, and Microstructure of Shale Brick. - Amer. Ceramic Soc. Bull., **64** (5): 674-678, 22 Abb., 2 Tab.; Columbus/Ohio.
- MATTEOLI, U., & MANGANELLI DEL FÁ, C., et al. (1981): Humidity in stones - II - Humidity and temperature determinations in various lithotypes. - In: ROSSI-MANARES, R. [Hrsg.]: The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, **31** (Part A): 475-481, 4 Abb.; Bologna.
- MAY, A. (1987): Der Massenkalk (Devon) nördlich von Brilon (Sauerland). - Geol. Paläont. Westfalen, **10**: 51-84, 12 Abb., 1 Tab.; Münster (Landschaftsverband Westfalen-Lippe).
- MAY, A. (1988): Fossilführung und Paläökologie des lagunären Massenkalkes (Devon) im Sauerland (Rheinisches Schiefergebirge). - Paläont. Z., **62** (3/4): 175-192, 6 Abb., 4 Tab.; Stuttgart.
- MAY, A. (1992): Die Kalkalgen-Flora des Ober-Eifeliums und Unter-Givetiums (Devon) des nordwestlichen Sauerlandes (Rheinisches Schiefergebirge). - Palaeontographica, **B 228**: 1-28, 2 Abb., 1 Tab., Taf. 1-5; Stuttgart.
- MAY, A. (1993): Stratigraphie, Stromatoporen-Fauna und Paläökologie von Korallenkalen aus dem Ober-Eifelium und Unter-Givetium (Devon) des nordwestlichen Sauerlandes (Rheinisches Schiefergebirge). - Geol. Paläont. Westfalen, **24**: 93 S., 3 Abb., 4 Tab., 12 Taf.; Münster (Landschaftsverband Westfalen-Lippe).
- MAY, A. (1994a): Microfacies Controls on Weathering of Carbonate Building Stones: Devonian (Northern Sauerland, Germany). - Facies, **30**: 193-208, 1 Abb., 2 Tab., Taf. 37-39; Erlangen.
- MAY, A. (1994b): Über die Verwitterung von Naturbausteinen aus Kalkstein - Welche Gesteine sind besonders verwitterungsbeständig und welche Rolle spielt die anthropogene Verschmutzung der Luft dabei? - Z. angew. Umweltforsch., **7** (2): 252-257, 1 Abb.; Berlin.
- MAY, A. (1994c): Verwitterungsbeständigkeit von Kalkstein des norddeutschen Muschelkalks, Teil 2. - Bautenschutz + Bausanierung, **17** (6): 79-83, Abb. 2-5; Köln.
- MAY, A. (1994d): Ein problematisches Mikrofossil aus dem Oberen Muschelkalk Ost-Westfalens. - Dortmunder Beitr. Landeskde., naturwiss. Mitt., **28**: 33-42, 5 Abb.; Dortmund.
- MAY, A. (1994e): Foraminiferen, Kalkalgen und andere Mikrofossilien aus dem Givetium und Frasnium (Devon) des Sauerlandes (Rheinisches Schiefergebirge). - Dortmunder Beitr. Landeskde., naturwiss. Mitt., **28**: 7-31, 19 Abb., 2 Tab.; Dortmund.
- MAYER, G. (1952): Lebensspuren von Bohrorganismen aus dem Unteren Hauptmuschelkalk (Trochitenkalk) des Kraichgaus. - N. Jb. Geol. Paläont., Mh., **1952**: 450-456, 9 Abb.; Stuttgart.
- MAZUREK, J. (1985): The ultrasonic examination of structure changes in the stone of historical monuments. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. 1: 55-65, 9 Abb.; Lausanne.
- McGEE, E. S. (1992): Alteration crusts on a marble building: Contributions from exposure. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 257-266, 7 Abb.; Lisbon.
- McILREATH, I. A., & JAMES, N. P. (1984): Carbonate Slopes. - In: WALKER, R. G. [Hrsg.]: Facies Models, Second Edition; Geoscience Canada, Repr. Ser., **1**: 245-257, 16 Abb.; Toronto (Geol. Assoc. Canada).
- McKENZIE, J. A. (1991): The Dolomite Problem: An Outstanding Controversy. - In: MÜLLER, D. W.; McKENZIE, J. A., & WEISSERT, H. [Hrsg.]: Controversies in Modern Geology: 37-54, 6 Abb.; London (Academic Press).
- McMAHON, D. J.; SANDBERG, P.; FOLLIARD, K., & MEHTA, P. K. (1992): Deterioration mechanisms of sodium sulfate. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 705-714, 4 Abb.; Lisbon.
- MEDUNA, U., & BAUSCH, W. M. (1985): Mineralogische und geochemische Untersuchungen am Muschelkalk der Bohrung Dinkelsbühl. - Geol. Bl. NO-Bayern, **34/35** [FREYBERG-Gedenkschrift]: 57-90, 7 Abb., 7 Tab., Taf. 02-03; Erlangen.
- MEHL, J. (1982): Die Tempestit-Fazies im Oberen Muschelkalk Südbadens. - Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **24**: 91-109, 6 Abb.; Freiburg/Breisgau.
- MEISCHNER, K.-D. (1964): Allogapische Kalke, Turbidite in Riff-nahen Sedimentations-Becken. - In: BOUMA, A. H., & BROUWER, A. [Hrsg.]: Turbidities; Developments in Sedimentology, **3**: 156-191, 5 Abb., 3 Taf.; Amsterdam (Elsevier).
- MEISEL, U. (1988): Naturstein. Erhaltung und Restaurierung von Außenbauteilen. - 195 S., 371 Abb.; Wiesbaden & Berlin (Bauverlag).
- MELLO, E., & GALANTE, F., et al. (1982): Provenance Studies of the White Marble of the Como Cathedral by Neutron Activation Analysis and Statistical Treatment. - In: GAURI, K. L., & GWINN, J. A. [Hrsg.]: Fourth International Congress

- on Deterioration and Preservation of Stone Objects: 249-259, 3 Abb., 3 Tab.; Louisville/Kentucky (Univ. of Louisville).
- MENTLER, A.; MÜLLER, H. W., & SCHWAIGHOFER, B. (1985): Zur biogenen Verwitterung des Kalksandsteines am Stephansdom in Wien. - Wiener Ber. ü. Naturwiss. i. d. Kunst, **2/3**: 212-229, 21 Abb., 7 Tab.; Wien.
- MENTLER, A.; MÜLLER, H. W., & SCHWAIGHOFER, B. (1986): Verwitterungsstudien an Naturbausteinen im Wiener Stadtgebiet und in Steinbrüchen des Leithagebirges im Burgenland. - Mitt. österr. geol. Ges., **79**: 309-325, 14 Abb., 3 Tab.; Wien.
- MESTWERDT, A., & BURRE, O. (1981): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25000. Erläuterungen zu Blatt **3917** Bielefeld [2. Aufl.]: xii + 39 S., 2 Abb., 1 Tab.; Krefeld. - [wie 1. Aufl. von 1926, nur durch Vorbemerkungen ergänzt].
- METZ, F., & KNÖFEL, D. (1991): Quecksilberdruckporosimetrie-Vergleichsmessungen an Natursteinproben zur Ermittlung der Wiederholbarkeit und der Vergleichbarkeit. - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1989 [= Bd. 1]: 259-287; Berlin (Ernst & Sohn).
- MEYER, D. E. (1992): Geowissenschaftliche Forschung auf dem Naturwerksteinsektor. - Die Geowissenschaften, **10** (9-10): 246-250, 1 Abb.; Weinheim.
- MIRWALD, P. W. (1987a): Naturwissenschaftliche Grundlagen - Physik. - In: KIESOW, G. et al. (1987): Naturwerkstein in der Denkmalpflege: 947-972, 17 Abb., 10 Tab.; Ulm.
- MIRWALD, P. W. (1987b): Forschungsbericht zum Projekt des Ministers für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: „Praxisorientierte Grundlagenuntersuchungen zur Stadtentwicklung: Untersuchungen zur Korrosion beim Baumberger Kalksandstein und Ruhrsandstein“. - 410 S.; Bochum (Zollern-Institut beim Deutschen Bergbau-Museum).
- MIRWALD, P. W., & BRÜGGERHOFF, S. (1995): Verwitterungsvorgänge an Kalkstein unter mitteleuropäischen Klima- und Immissionsbedingungen - Ergebnisse aus Freiland-Expositionsversuchen. - Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, **20**: 207-220, 5 Abb.; Innsbruck.
- MIRWALD, P. W., & ZALLMANZIG, J., et al. (1987): Natursteinzerstörung an Denkmälern durch anthropogene Umwelteinflüsse. - Der Anschnitt, **39** (5-6): 283-291, 15 Abb.
- MÜLLER, F. (1987): Historische Baustoffe - Gesteine. - In: KIESOW, G. et al.: Naturwerkstein in der Denkmalpflege: 345-407; Ulm (Ebner Verlag).
- MÜLLER, G. (1988): Salzgesteine (Evaporite). - In: FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.]: Sedimente und Sedimentgesteine: 435-500, 39 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart). - [4., neubearb. Aufl.].
- MÜLLER, H. W.; SCHWAIGHOFER, B.; KALMAN, W.; OTTNER, F., & SCHNEIDER, W. (1990): A photogrammetric survey of St. Stephen's Cathedral in Vienna as a basis for the mapping of petrological composition and the state of weathering. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. **4**: 2039-2042, 4 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- NADJAFI, M. (1979): Feinstratigraphische und paläogeographische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk zwischen Hann. Münden und Braunschweig. - Clausthaler geol. Abh., **33**: 101 S., 2 Abb., 5 Tab., 14 Taf., 5 Bildtaf.; Clausthal-Zellerfeld.
- NAKAMURA, M. (1988a): Indirect Evaluation of Frost Susceptibility of Building Materials. - Amer. Ceramic Soc. Bull., **67** (12): 1964-1965; Westerville/Ohio.
- NAKAMURA, M. (1988b): Automatic Unidirectional Freeze-Thaw Test for Frost Durability of Building Materials. - Amer. Ceramic Soc. Bull., **67** (12): 1966-1968, 4 Abb., 1 Tab.; Westerville/Ohio.
- NEUMANN, M.; POZARYSKA, K., & VACHARD, D. (1975): Remarques sur le microfacies du Dévonien de Lublin (Pologne). - Rev. Micropaléont., **18** (1): 38-52, 5 Abb., 3 Taf.; Paris.
- NIESEL, K. (1979): Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeloxidhaltiger Atmosphäre - Literaturdiskussion. - Fortschr. Miner., **57** (1): 68-124, 14 Abb.; Stuttgart.
- NIESEL, K. (1982): Möglichkeiten der Beurteilung des Verwitterungsverhaltens von porösen Werksteinen: Bedeutung der gefügeabhängigen Kriterien. - Fortschr. Miner., **60** (1): 81-100, 8 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- NIESEL, K. (1986a): Aspekte der Natursteinverwitterung aus der Sicht eines Materialprüfers (1. Teil). - Bautenschutz + Bausanierung, **9** (1): 16-23, Abb. 1-7; Köln.
- NIESEL, K. (1986b): Aspekte der Natursteinverwitterung aus der Sicht eines Materialprüfers (2. Teil). - Bautenschutz + Bausanierung, **9** (2): [60]-[66], Abb. 8-9; Köln.
- NIESEL, K., & SCHIMMELWITZ, P. (1982): Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale. - BAM-Forschungsbericht, **86**: 100 S., 43 Abb.; Berlin (Bundesanst. f. Materialprüfung).
- NIJS, R. (1985): Petrographical characterization of calcareous building stones in Northern Belgium. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. **1**: 13-21, 7 Abb. Abb.; Lausanne.
- NIJS, R. (1991): Wat natuursteen lijden kan. Geduldig knagend vernietigt de tijd langzaam maar zeker alle monumenten. - Eos, **6**: 56-64; Washington.

- NIJS, R.; DE GEYTER, G., & FOBE, B. (1988): Decay of sandy limestones in Flanders' historical monuments. - In: CIA-BACH, J. [Hrsg.]: Proceedings Vth international congress on deterioration and conservation of stone: 110-115, 4 Abb.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- NIJS, R., & DE GEYTER, G. (1991): Local natural substitutes for weathered historical building stones in Flanders. - In: Proceedings of the European Symposium „Science, Technology, and European Cultural Heritage“, Bologna 1989: 671-674; Bologna.
- NÖTH, S. (1991): Die Conodontendiagenese als Inkohlungsparameter und ein Vergleich unterschiedlich sensibler Diageneseindikatoren am Beispiel von Triassedimenten Nord- und Mitteldeutschlands. - Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **37**: 169 S., 46 Abb., 14 Tab., 3 Taf.; Bochum.
- NOLTE, H. (1982): Zur Geologie der Berlebecker Achse zwischen Hiddesen und Horn-Bad Meinberg unter besonderer Berücksichtigung der Stratigraphie des Oberen Muschelkalks. - Münster. Forsch. Geol. Paläont., **55**: 41-55, 3 Abb., 2 Tab., 1 Beil.; Münster.
- NOLTE, J. (1989): Die Stratigraphie und Palökologie des Unteren Hauptmuschelkalkes (mo1, Mittl. Trias) von Unterfranken. - Berliner geowiss. Abh., **A 106**: 303-341, 6 Abb., 2 Taf.; Berlin.
- ORDAZ, J., & ESBERT, R. M. (1985): Porosity and capillarity in some sandstone and dolomite monumental stones. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. 1: 93-99, 6 Abb., 5 Tab.; Lausanne.
- OZOL, M. A. (1984): Effect of the solvent action of saturated sulfate solutions on limestones in the ASTM soundness test. - Bull. internat. Assoc. engng. Geol., **29**: 415-417, 2 Abb., 1 Tab.; Paris.
- PAN, Bietong (1988): Geological hazards, prevention and treatment of Longmen Grottoes in China. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. 1: 301-308, 7 Abb., 3 Tab.; Rotterdam (Balkema).
- PASCHINGER, H. (1985): Alpenmarmor - Schäden und Konservierung. - In: PETZET, M. [Hrsg.]: Natursteinkonservierung; Arbeitsh. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **31**: 163-166, 4 Abb.; München.
- PELLERIN, F. M. (1976): Influence de la dolomie dans un cas d'altération de tunnel ferroviaire. - 2me Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre: 67-78, 8 Abb.; Athènes (Chaire de Chimie Physique de l' U.T.N. d'Athènes).
- PENKALA, B., & BRALEWSKA, E. (1976): Processes of Destructing Sandstones in Relic Buildings According to their Binding Agents. - 2me Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre: 219-224, 9 Abb.; Athènes (Chaire de Chimie Physique de l' U.T.N. d'Athènes).
- PEMBERTON, S. G., & FREY, R. W. (1982): Trace Fossil Nomenclature and the *Planolites-Palaeophycus* Dilemma. - J. Paleont., **56** (4): 843-881, 2 Abb.; 5 Taf.; Tulsa.
- PESCHEL, A. (1977): Natursteine. - 390 S., 151 Abb., 140 Tab.; Leipzig.
- PETZET, M. [Hrsg.] (1985): Natursteinkonservierung. Internationales Kolloquium, München, 21./22. Mai. 1984. - Arbeitsh. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **31**: 191 S.; München.
- POLLACK, V. (1923): Verwitterung in der Natur und an Bauwerken. - 580 S., 120 Abb., 1 Taf.; Leipzig.
- POSCHLOD, K., & GRIMM, W.-D. (1988): The characterization of the pore space of crystalline natural stones. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. 2: 815-818, 6 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- PREAT, A., & MAMET, B. (1989): Sédimentation de la plate-forme carbonatée givétienne franco-belge. - Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine, **13** (1): 47-86, 8 Abb., 6 Tab., 10 Taf.; Boussens / France.
- PROUT, W., & HOFF, W. D. (1991): Fundamental studies of frost damage in clay brick. - In: BAKER, J. M.; NIXON, P. J.; MAJUMDAR, A. J., & DAVIES, H. [Hrsg.]: Durability of Building Materials and Components; Proc. fifth internat. Conf. Brighton 1990: 39-51, 3 Abb., 3 Tab.; London (E. & F. N. Spon).
- PUNURU, A. R.; CHOWDHURY, A. N.; KULSHRESHTHA, N. P., & GAURI, K. L. (1990): Control of Porosity on Durability of Limestone at the Great Sphinx. - Environ. Geol. Water Sci., **15** (3): 225-232, 4 Abb., 3 Tab.; New York.
- QUEISSER, A.; PLATEN, H. v., & FÜRST, M. (1985): Rebound and ultrasonic investigations on freestones of Bamberg area, F. R. Germany. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Lausanne, 25.-27.9.1985; Actes, Vol. 1: 79-86, 3 Abb.; Lausanne.
- DE QUERVAIN, F. (1945): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil I. - Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., **23**: 56 S., 82 Abb., 2 Tab.; Bern.
- DE QUERVAIN, F. (1967): Technische Gesteinskunde. - 261 S., 124 Abb., 56 Tab.; Basel & Stuttgart (Birkhäuser). - [2., neubearb. Aufl.].
- RACKI, G. (1993): Evolution of the bank to reef complex in the Devonian of the Holy Cross Mountains. - Acta palaeont. polonica, **37** (2-4): 87-182, 42 Abb. 3 Tab.; Warszawa.
- RACKI, G., & SOBON-PODGÓRSKA, J. (1993): Givetian and Frasnian calcareous microbios of the Holy Cross Mountains. - Acta palaeont. polonica, **37** (2-4): 255-289, 17 Abb.; Warszawa.
- RAUSCHENFELS, E. (1970): Untersuchungen über die Frostwiderstandsfähigkeit von Kalksandsteinen. - Diss., Fak. Berg-

- bau, Hüttenwes. u. Maschinenwes. TU Clausthal: 85 S., 37 Abb.; Clausthal-Zellerfeld.
- REDDY, M. M.; SHERWOOD, S., & DOE, B. (1985): Limestone and marble dissolution by acid rain. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. 1: 517-526, 3 Abb., 2 Tab.; Lausanne.
- REICHEL, H. (1975): Die Natursteinverwitterung an Bauwerken als mikroklimatisches und edaphisches Problem in Mitteleuropa. - Tübinger geogr. Stud., **62**: viii + 88 S., 36 Abb.; Tübingen.
- REINSCH, D. (1991): Natursteinkunde. Eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze. - 315 S., 236 Abb., 16 Tab.; Stuttgart (Enke).
- RIDING, R., & JANSAN, L. F. (1974): *Uraloporella* Korde in the Devonian of Alberta. - Canadian J. Earth Sci., **11** (10): 1414-1426, 6 Abb., 1 Tab., 2 Taf.; Ottawa.
- RIDING, R., & JANSAN, L. F. (1976): Devonian Occurrence of *Uraloporella* (?Foraminifer) in the Canning Basin, Western Australia. - J. Paleont., **50** (5): 805-807, 1 Abb.; Tulsa/Oklahoma.
- RIEDERER, J. (1973): Bibliographie der deutschsprachigen Literatur zur Verwitterung und Konservierung natürlicher Bausteine. - Deutsche Kunst u. Denkmalpflege, **31**: 106-118; München & Berlin.
- ROBERTSON, W. D. (1982): Evaluation of the Durability of Limestone Masonry in Historic Buildings.. - In: GAURI, K. L., & GWINN, J. A. [Hrsg.]: Fourth International Congress on Deterioration and Preservation of Stone Objects: 261-278, 9 Abb.; Louisville/Kentucky (Univ. of Louisville).
- ROBERTSON, W. D. (1985): A three dimensional description of the pore structure in limestones. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. 1: 87-92, 2 Abb., 2 Tab.; Lausanne.
- ROBINSON, G. C. (1984): The Relationship Between Pore Structure and Durability of Brick. - Amer. Ceramic Soc. Bull., **63** (2): 295-300, 18 Abb.; Columbus/Ohio.
- ROBINSON, G. C.; HOLMAN, J. R., & EDWARDS, J. E. (1977): Relation Between Physical Properties and Durability of Commercially Marketed Brick. - Amer. Ceramic Soc. Bull., **56** (12): 1071-1075, 1079, 8 Abb., 5 Tab.; Columbus/Ohio.
- RÖHL, U. (1986): Feinstratigraphie und Mikrofazies des Oberen Muschelkalks im Hildesheimer Wald. - N. Jb. Geol. Paläont., Mh., **1986** (8): 489-511, 7 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- RÖHL, U. (1988): Geochemische Faziesvergleiche im Oberen Muschelkalk Nord- und Mitteldeutschlands. - In: RICHTER, D. K. [Hrsg.]: 3. Treffen deutschsprachiger Sedimentologen 23.-26. Mai 1988 in Bochum; Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **29**: 159-162, 4 Abb.; Bochum.
- RÖHL, U. (1990a): Parallelisierung des norddeutschen oberen Muschelkalks mit dem süddeutschen Hauptmuschelkalk anhand von Sedimentationszyklen. - Geol. Rdsch., **79** (1): 13-26, 7 Abb.; Stuttgart.
- RÖHL, U. (1990b): Blei- und Zinkanomalien im Oberen Muschelkalk Nord- und Mitteldeutschlands. - Z. dtsch. geol. Ges., **141** (1): 151-163, 10 Abb.; Hannover.
- RÖHL, U. (1993): Sequenzstratigraphie im zyklisch gegliederten Oberen Muschelkalk Norddeutschlands. - In: HAGDORN, H., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991; Sonderbd. Ges. Naturkde. Württemberg, **2**: 29-36, 7 Abb.; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- ROEKENS, E., & LEYSEN, L., et al. (1988): Weathering of Maastricht limestone used in the construction of historical buildings in Limburg, Belgium. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: Proceedings Vth international congress on deterioration and conservation of stone: 45-56, 4 Abb.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- ROHATSCH, A. (1991): St. Stephan. Herkunft, Petrographie und Verwitterung der Baugesteine des Albertinischen Chores. - Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., **37**: 141-155, 4 Abb., Beil. 2; Wien.
- ROSENFELD, U. (1978): Beitrag zur Paläogeographie des Mesozoikums in Westfalen. - N. Jb. Geol. Paläont., Abh., **156** (1): 132-155, 9 Abb.; Stuttgart.
- ROSENFELD, U. [Hrsg.] (1982): Beiträge zur Geologie des Lippischen Berglandes. - Münster. Forsch. Geol. Paläont., **55**: 147 S., 15 Abb., 14 Tab., 4 Taf.; Münster.
- ROSENFELD, U., & THIELE, I. (1992): Der Untere Muschelkalk am Nordrand der Rheinischen Masse; Fazies und Mächtigkeiten (Trias, NW-Deutschland). - N. Jb. Geol. Paläont., Mh., **1992** (8): 487-512, 8 Abb.; Stuttgart.
- ROSS, K. D.; HART, D., & BUTLIN, R. N. (1991): Durability tests for natural building stone. - In: BAKER, J. M.; NIXON, P. J.; MAJUMDAR, A. J., & DAVIES, H. [Hrsg.]: Durability of Building Materials and Components; Proc. fifth internat. Conf. Brighton 1990: 97-111, 3 Abb., 3 Tab.; London (E. & F. N. Spon).
- ROSS, M.; MCGEE, E. S., & ROSS, D. R. (1989): Chemical and mineralogical effects of acid deposition on Shelburne Marble and Salem Limestone test samples placed at four NAPAP weather-monitoring sites. - Amer. Mineralogist, **74**: 367-383, 7 Abb., 8 Tab.; Lawrence / Kansas.
- ROSSI-MANARES, R., & GHEZZO, C. (1978): Communication 7.9: La biocalcarene des temples grecs d'Agrigente: Causes d'altération et efficacité des traitements de conservation. - In: UNESCO/RILEM Colloque international Altération et protection des monuments en pierre, Tome IV: 30-35; Paris.
- ROSSI-MANARES, R.; TUCCI, A., & GRILLINI, G. C. (1992): Palazzo dei Diamanti in Ferrara - a case study. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 563-572, 8 Abb.; Lisbon.

- SAGE, J. D. (1988): Thermal microfracturing of marble. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. 2: 1013-1018, 9 Abb., 3 Tab.; Rotterdam (Balkema).
- SATTLER, L. et al. (1990): Konservierung von carbonatisiertem Grünsandstein an der Alten Pinakothek in München. - Bautenschutz + Bausanierung, **13** (6): [93]-[97], 11 Abb.; Köln.
- SAUDER, M., & WIESEN, H. (1987): Sanierung von Bauwerken aus Naturstein. - Landesinstitut f. Bauwesen u. angewandte Bauschadensforschung, **1987-2.2**: 85 S., 20 Abb.; Aachen.
- SCALI, M. J., & STOCKBRIDGE, J. G. (1982): Evaluation of the Durability and Long-Term Performance of Natural Stone. - In: GAURI, K. L., & GWINN, J. A. [Hrsg.]: Fourth International Congress on Deterioration and Preservation of Stone Objects: 295-306; Louisville/Kentucky (Univ. of Louisville).
- SCHÄFER, H.-G. (1990): Die Zerstörung von Bauwerken durch Luftschadstoffe. - EntsorgungsPraxis, **8** (12): 732-735, 2 Abb.; Gütersloh (Bertelsmann).
- SCHÄFER, P., & SENOWBARI-DARYAN, B. (1983): Die Kalkalgen aus der Obertrias von Hydra, Griechenland. - Palaeontographica, **B 185** (4-6): 83-142, 8 Abb., 1 Tab., Taf. 31-40; Stuttgart.
- SCHAFER, R. J. (1932): The Weathering of Natural Building Stones. - Department of scientific and industrial research, Building research, Spec. report, **18**: x + 142 S., 52 Abb., 14 Tab.; Nottingham. - [Reprint von 1972; nur Appendix II geändert].
- SCHMIDT, G. (1983): Geschichtlicher Rückblick. - In: 1908-1983, 75 Jahre Kirche Helpup: 10-26; Helpup (Evangelisch-reformierte Kirchengemeinde).
- SCHMIDT, H. (1992): Mikrobohrspuren ausgewählter Faziesbereiche der tethyalen und germanischen Trias (Beschreibung, Vergleich und bathymetrische Interpretation). - Frankfurter geowiss. Arb., Ser. **A**, **12**: 228 S., 45 Abb., 9 Tab., 11 Taf.; Frankfurt a. M.
- SCHMIDT, H. (1993): Mikrobohrspuren in Makrobenthonten des Oberen Muschelkalks von SW-Deutschland. - In: HAGDORN, H., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991; Sonderbd. Ges. Naturkde. Württemberg, **2**: 271-278, 4 Abb., 2 Tab.; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- SCHMIDT-THOMSEN, K. (1969): Zum Problem der Steinzerstörung und Konservierung. - Deutsche Kunst u. Denkmalpflege, **27** (1): 11-23; München & Berlin.
- SCHNEIDER, E. (1957): Beiträge zur Kenntnis des Trochitenkalkes des Saarlandes und der angrenzenden Gebiete. - Ann. Univ. Saraviensis, Sci., **6** (2/3): 185-258, Taf. 1-9 + I-X; Saarbrücken.
- SCHNEIDER, W. (1977): Diagenese devonischer Karbonatkomplexe Mitteleuropas. - Geol. Jb., **D 21**: 107 S., 11 Abb., 7 Tab., 8 Taf.; Hannover.
- SCHOLTEN, D.; KRAUS, K., & KNÖFEL, D. (1991): Die Verwitterung des Baumberger Sandsteins am Xantener Dom. - Bautenschutz + Bausanierung, **14** (3): [39]-[44], 8 Abb., 7 Tab.; Köln.
- SCHRADER, W. (1984): Analyse metallurgischer Proben mit der ICP-AES. - In: WELZ, B. [Hrsg.]: Fortschritte in der atomspektrometrischen Spurenanalytik, Bd. 1: 221-231, 11 Abb., 5 Tab.; Weinheim.
- SCHUDACK, M. E. (1993): Karbonatzyklen in Riff- und Lagunenbereichen des devonischen Massenkalkkomplexes von Asbeck (Hönnetal, Rheinisches Schiefergebirge). - Geol. Paläont. Westfalen, **26**: 77-106, 19 Abb.; Münster (Landchaftsverband Westfalen-Lippe).
- SCHULZ, M.-G. (1972): Feinstratigraphie und Zyklengliederung des Unteren Muschelkalks in N-Hessen. - Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, **41**: 133-170, 2 Abb., 6 Tab., 4 Profiltaf.; Hamburg.
- SCHWARZ, A., et al. (1991a): Bewitterung von Natursteinen mit schadgashaltiger Luft - orientierende Simulationsversuche in einer Doppelklimakammer, Teil 1. - Bautenschutz + Bausanierung, **14** (5): [95]-[97], Abb. 1-4; Köln.
- SCHWARZ, A., et al. (1991b): Bewitterung von Natursteinen mit schadgashaltiger Luft - orientierende Simulationsversuche in einer Doppelklimakammer, Teil 2. - Bautenschutz + Bausanierung, **14** (6): [108]-[110], Abb. 5-8; Köln.
- SCHWARZ, H.-U. (1975): Sedimentary structures and facies analysis of shallow marine carbonates (Lower Muschelkalk, Middle Triassic, Southwestern Germany). - Contr. Sedimentol., **3**: 100 S., 35 Abb., 1 Tab., 11 Taf.; Stuttgart.
- SCHWARZ, M. (1985): Räumlicher und zeitlicher Ablauf der Sedimentation im Oberen Hauptmuschelkalk (Trias) von Südwestdeutschland. - Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, n. F., **81**: 11-50, 23 Abb., 3 Tab.; Stuttgart.
- SCHWARZ, U. (1986): Bestandsaufnahme der Naturwerksteine und ihres Verwitterungszustandes in der Innenstadt Münchens. - Diss., Fak. f. Geowiss., Univ. München: 239 S., 71 Abb., 61 Tab., 3 Anl.; München.
- SCHWARZ, U. (1990): Rasterelektronenmikroskopische (REM-) Aufnahmen an Naturwerksteinen der Bundesrepublik Deutschland. - In: GRIMM, W.-D. [Hrsg.]: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland; Arbeitsb. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **50**: 105-128, 16 Taf.; München.
- SCHWENKE, W. (1993): Beiträge zur Stratigraphie und Fazies des Oberen Muschelkalks am Nordostrand der Rheinischen Masse. - Diss. FB Geowiss. Univ. Münster: 246 S., 84 Abb., 2 Tab., 10 Profiltaf.; Münster.
- SEBASTIAN PARDO, E., & RODRIGUEZ-NAVARRO, C., et al. (1992): Petrographic study, evaluation of the state of decay and proposals for preservation of stony materials from Jaen Cathedral (Spain). - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and

- Conservation of Stone: 29-38, 5 Abb.; Lisbon.
- SEEGER, P. (1968): Gesteinsverwitterung an Bauwerken. - In: BETTENSTEDT, F., & WACHENDORF, H. [Hrsg.]: Gerhard-Keller-Festschrift; Beih. Ber. naturhist. Ges. Hannover, **5**: 35-57, 2 Abb., 2 Taf.; Hannover.
- SEILACHER, A. (1993): Fossilagerstätten im Muschelkalk. - In: HAGDORN, H., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991; Sonderbd. Ges. Naturkde. Württemberg, **2**: 215-222, 4 Abb.; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- SEILACHER, A., & AIGNER, T. (1991): Storm Deposition at the Bed, Facies, and Basin Scale: the Geologic Perspective. - In: EINSELE, G.; RICKEN, W., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: Cycles and Events in Stratigraphy: 249-267, 6 Abb.; Berlin & Heidelberg (Springer).
- SHERWOOD, S. I., & DOLSKE, D. A. (1992): Acid deposition impacts on marble monuments at Gettysburg. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 247-255, 6 Abb.; Lisbon.
- SHERWOOD, S. I., & REDDY, M. M. (1988): A field study of pollutant effects on carbonate stone dissolution. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites; Vol. **2**: 917-923, 13 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- SICARDY, O. (1985): La numérisation des images radiographiques et son application à la caractérisation des roches calcaires. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Vol. **1**: 41-48, 8 Abb.; Lausanne.
- SIKIOTIS, D.; KIRKITSOS, P., & DELOPOULOU, P. (1992): Adverse effects of atmospheric nitrates on marble monuments. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 207-216, 2 Abb., 2 Tab.; Lisbon.
- SIMON, T.; ENGESSER, W., & LEIBER, J. (1992): Stratigraphie des Unteren Muschelkalks im nördlichen Kraichgau. - Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **34**: 271-290, 4 Abb.; Freiburg.
- SIMPER, M. A. (1991): Die Naturwerksteine Nordrhein-Westfalens und Verwitterungserscheinungen historischer Bausteine am Beispiel dortiger Grabdenkmäler. - Münchner geol. Hefte, **3**: 227 S., 72 Abb., 39 Tab., 4 Taf.; München.
- SKUPIN, K. (1970): Feinstratigraphische und mikrofazielle Untersuchungen im Unteren Hauptmuschelkalk (Trochitenkalk) des Neckar-Jagst-Kocher-Gebietes. - Arb. geol.-paläont. Inst. Univ. Stuttgart, N. F. **63**: 173 S., 18 Abb., 33 Tab., 8 Taf.; Stuttgart.
- SKUPIN, K. (1973): Stratigraphy and microfacies in the crinoidal limestones (Trochiten Limestone, Triassic) of southwest Germany. - Sediment. Geol., **9** (1): 1-19, 9 Abb.; Amsterdam.
- SNETHLAGE, R. (1984): Adneter Rotmarmor - Eigenschaften, Schadensbilder und Konservierungsmöglichkeiten. - In: GRIMM, W.-D., & SNETHLAGE, R.: Adneter Rotmarmor. Vorkommen und Konservierung; Arbeitsh. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **25**: 27-41, Abb. 18-34; München.
- SNETHLAGE, R. [Hrsg.] (1991): Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1989 [= Bd. **1**]. - xii + 360 S., 222 Abb.; Berlin (Ernst & Sohn). - [Mit Publikationsliste].
- SNETHLAGE, R., & SIMON, S. (1992): EUREKA Project EU 496 EUROCARE-EUROMARBLE. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 21-27, 4 Abb.; Lisbon.
- SPADEA, P. (1992): Mineralogical and petrographical factors of the alteration of the carbonate stones from the Duomo of Udine portal (Italy). - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 819-825, 4 Abb.; Lisbon.
- ŠRAMEK, J. (1989): Relation between mineral composition and the physical mechanical properties of the sandstones of the Hořice ridge and further localities. - Acta Univ. Carolinae, Geol., **1989** (2): 209-222, 9 Abb.; Praha. - [Tschechisch mit englischer Zusammenf.].
- STEIN, V. (1968): Stratigraphische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk Südniedersachsens. - Z. dtsh. geol. Ges., **117**: 819-828, 1 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- STEIN, V. (1981): Naturwerksteine im niedersächsischen Kirchenbau. - Geol. Jb., **D44**: 22 S., 1 Abb., 2 Taf.; Hannover.
- STEIN, V. (1983): Naturwerksteine im Kirchenbau im Gebiet Hildesheim-Peine-Salzgitter. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“ (Hannover, 7. u. 8. März 1983): 114-116; Erlangen.
- STORCH, W., & TUR, P. (1991): Untersuchung einiger Schädigungsvorgänge an Natursteinen mittels Schallemissionsanalyse. - In: SNETHLAGE, R. [Hrsg.]: Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1989 [= Bd. **1**]: 189-195, 6 Abb.; Berlin.
- STRAUCH, F. (1990): Zur Gliederung einiger känozoischer Schill-Typen. - N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **181** (1-3): 417-430, 1 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- STRITZKE, R. (1989): Stratigraphie, Faziesanalyse und Paläogeographie im Oberdevon des Briloner Vorriffgebiets (Ost-sauerland). - Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., **35**: 75-106, 6 Abb., 3 Tab., 3 Taf.; Krefeld.
- STRITZKE, R. (1990): Die Karbonatsedimentation im Briloner Vorriffbereich. - Geol. Jb., **D 95**: 253-315, 9 Abb., 3 Tab., 3

Taf.; Hannover.

- SWEETING, M. M. (1966): The Weathering of Limestones, with particular reference to the Carboniferous Limestones of Northern England. - In: DURY, G. H. [Hrsg.]: *Essays in Geomorphology*: 177-210, 11 Abb.; London.
- TABASSO, M. (1978): Some considerations on the results of tests in common carried out by members of the Group RILEM 25 P. E. M. - In: UNESCO/RILEM Colloque international *Altération et protection des monuments en pierre*, Tome V: 1-20, 10 Taf.; Paris.
- THEOULAKIS, P., & MOROPOULOU, T. (1988): Mechanism of deterioration of the sandstone of the medieval city and the castle of Rhodes. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: *Proceedings VIth international congress on deterioration and conservation of stone*: 86-96, 18 Abb., 3 Tab.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- THIELE, I. (1990): Der Untere Muschelkalk am Nordrand der Rheinischen Masse. - Diss., FB Geowiss. Univ. Münster: v + 112 S., 50 Abb., 7 Tab., 101 Anl.; Münster.
- TÖRÖK, Á. (1993): Storm influenced sedimentation in the Hungarian Muschelkalk. - In: HAGDORN, H., & SEILACHER, A. [Hrsg.]: *Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991*; Sonderbd. Ges. Naturkde. Württemberg, 2: 133-142, 25 Abb.; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- TOOMEY, D. F.; MOUNTJOY, E. W., & MacKENZIE, W. S. (1970): Upper Devonian (Frasnian) algae and foraminifera from the Ancient Wall carbonate complex, Jasper National Park, Alberta, Canada. - *Canadian J. Earth Sci.*, 7 (3): 946-981, 5 Abb., 10 Tab., 7 Taf.; Ottawa.
- TUCKER, M. E., & WRIGHT, V. P. (1990): *Carbonate Sedimentology*. - xiii + 482 S.; Oxford (Blackwell).
- UNESCO/RILEM [Hrsg.] (1978a): Test N° I.4: Pore-size distribution (suction). - In: UNESCO/RILEM Colloque international *Altération et protection des monuments en pierre*, Tome V: 1-15, 3 Taf.; Paris.
- UNESCO/RILEM [Hrsg.] (1978b): Test N° I.5: Pore distribution (mercury porosity). - In: UNESCO/RILEM Colloque international *Altération et protection des monuments en pierre*, Tome V: 1-5; Paris.
- UNESCO/RILEM [Hrsg.] (1978c): Test N° II.1: Saturation coefficient, S. - In: UNESCO/RILEM Colloque international *Altération et protection des monuments en pierre*, Tome V: 1-4; Paris.
- UNESCO/RILEM [Hrsg.] (1978d): Test N° III.2: Determination of the dynamic modulus of elasticity by pulse velocity. - In: UNESCO/RILEM Colloque international *Altération et protection des monuments en pierre*, Tome V: 1-4; Paris.
- URZI, C. E.; KRUMBEIN, W. E., & PERNICE, A. (1992): Microbiological investigations on the biodeterioration and decomposition of marbles. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 429-435, 1 Abb.; Lisbon.
- VACHARD, D. (1988): Foraminifères et Moravaminidés du Givétien et du Frasnien (Dévonien) du Boulonnais (France). - In: BRICE, D. [Hrsg.]: *Le Dévonien de Ferques. Bas-Boulonnais (N. France); Biostratigraphie du Paléozoïque*, 7: 87-101, 2 Abb., Taf. 8-10; Brest (Univ. de Bretagne Occidentale).
- VACHARD, D. (1993): Algues, pseudo-algues et microfaciès carbonatés du Dévonien du Domaine Ligérien (Massif Armoricain, France). - *Palaeontographica*, B 229: 53-113, 16 Abb., 1 Tab., 7 Taf.; Stuttgart.
- VALDEÓN, L.; KING, M. S., & DE FREITAS, M. H. (1992): Ultrasonic methods for quantifying the degradation of building stones. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 697-704, 2 Abb.; Lisbon.
- VAN GEMERT, D., & VAN BALEN, K. (1988): Interaction between mortar and brick at frost degradation of masonry. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: *Proceedings VIth international congress on deterioration and conservation of stone*: 66-73, 7 Abb., 2 Tab.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- VAN GEMERT, D.; ULRICH, E., & VIAENE, W. (1988): Physico-chemical erosion of limestone: A micro-macro approach. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: *The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites*; Vol. 2: 805-808, 5 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- VEIZER, J. (1983): Trace Elements and Isotopes in Sedimentary Carbonates. - In: REEDER, R. J. [Hrsg.]: *Carbonates: Mineralogy and Chemistry*; *Reviews in Mineralogy*, 11: 265-299, 27 Abb.; Chelsea / Michigan.
- VENDRELL-SAZ, M., & GARCIA-VALLES, M. (1992): Decay mechanisms of the romanesque portal of Ripoll (Catalunya, Spain). - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 277-286, 12 Abb.; Lisbon.
- VLEUGELS, G. J.; ROEKENS, E. J., & VAN GRIEKEN, R. E. (1988): Micro-catchment study of the weathering of Balegem and Massengis limestones. - In: CIABACH, J. [Hrsg.]: *Proceedings VIth international congress on deterioration and conservation of stone*: 57-65, 3 Abb., 1 Tab.; Toruń (Nicholas Copernicus Univ.).
- VOGLER, H. (1977): Nutzbare Festgesteine in Nordrhein-Westfalen. - 65 S., 1 Abb., 1 Tab., 1 Taf.; Krefeld (Geol. Landesamt).
- VOLKWEIN, A. (1980): Ultraschalluntersuchungen an Naturwerkstein. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: *Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“ (München, 6. u. 7. März 1980)*: 61-77, 8 Abb.; Erlangen.
- WAGNER, W. (1991): Der Dolomitstein der Trier-Bitburger Mulde als Naturwerkstein-Rohstoff. - *Mainzer geowiss. Mitt.*, 20: 85-90, 1 Abb., 2 Tab.; Mainz.

- WALDER, J., & HALLET, B. (1985): A theoretical model of the fracture of rock during freezing. - *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **96**: 336-346, 8 Abb., 1 Tab.; Boulder/Colorado.
- WALKDEN, G. M., & BERRY, J. R. (1984): Syntaxial overgrowths in muddy crinoidal limestones: cathodoluminescence sheds new light on an old problem. - *Sedimentology*, **31**: 251-267, 9 Abb.; Oxford.
- WALSH, J. B., & BRACE, W. F. (1966): Cracks and pores in rocks. - In: *Proceedings of the 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisboa, Vol. 1: 643-646, 4 Abb.; Lissabon (Lab. Nac. Engenh. Civil). - [Report 3.67].
- WARSCHEID, T.; PETERSEN, K., & KRUMBEIN, W. E. (1989): Die Besiedlung unterschiedlicher Sandsteine durch chemoorganotrophe Bakterien und deren Einfluß auf den Prozeß der Gesteinszerstörung. - *Z. dtsh. geol. Ges.*, **140** (1): 209-217, 1 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- WEBER, J. (1985): Natural and artificial weathering of Austrian building stones due to air pollution. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: *Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*, Vol. 1: 527-535, 7 Abb.; Lausanne.
- WEDEPOHL, K. H. (1970): Geochemische Daten von sedimentären Karbonaten und Karbonatgesteinen in ihrem faziellen und petrogenetischen Aussagewert. - *Verh. geol. Bundesanst.*, **1970** (4): 692-705, 4 Abb.; Wien.
- WEISS, E. G. (1987): Porositäten, Permeabilitäten und Verkarstungserscheinungen im mittleren und oberen Malm der südlichen Frankenalb. - Diss., Naturwiss. Fak. Univ. Erlangen-Nürnberg: 211 S., 74 Abb., 16 Taf.; Erlangen.
- WEISS, E. G., & SCHELLHORN, H. (1989): Zur Bestimmung des Gesamtporenvolumens von Karbonatgesteinen. - *Z. dtsh. geol. Ges.*, **140** (1): 201-207, 2 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- WEISS, G. (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. - *Münchner geowiss. Abh.*, **B 9**: 1-118, 127 Abb., 41 Taf.; München.
- WEISS, G., & GRIMM, W.-D. (1990): Rasterelektronenmikroskopische Detektion von Eis in Sandsteinen mit Hilfe der Kryopräparation. - In: GRIMM, W.-D. [Hrsg.]: *Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland*; Arbeitsh. Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, **50**: 95-104, 3 Taf.; München.
- WEST, H. W. H. (1970): Clay products. - In: SIMPSON, J. W., & HOROBIN, P. J. [Hrsg.]: *The weathering and performance of building materials*: 105-133, 7 Abb.; Aylesbury / UK.
- WHALLEY, W. B.; SMITH, B. J.; MAGEE, R. W., & FASSINA, V. (1992): Short-term exposure of limestone test specimens in Venice. - In: DELGADO RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F., & TELMO JEREMIAS, F. [Hrsg.]: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 287-296, 6 Abb.; Lisbon.
- WIHR, R. (1986): Restaurierung von Steindenkmälern. Ein Handbuch für Restauratoren, Architekten, Steinbildhauer und Denkmalpfleger. - 236 S., 262 Abb.; München (Callwey). - [2., überarb. Aufl.].
- WILBRAND, J. (1932): Kurze Chronik des Sparrenbergs. - 18 S., 1 Plan; Bielefeld. - [10. Ausg.].
- WILSON, J. L. (1975): Carbonate facies in geologic history. - 471 S., 183 Abb., 30 Taf.; Berlin (Springer).
- WINKLER, E. M. (1973): *Stone: Properties, Durability in Man's Environment*. - *Applied Mineralogy*, **4**: 230 S., 150 Abb.; Wien & New York (Springer).
- WINKLER, E. M. (1978): Stone weathering: A literature review. - In: WINKLER, E. M. [Hrsg.]: *Decay and Preservation of Stone*; *Geol. Soc. Amer., Engng. Geol. Case Hist.*, **11**: 59-61; Boulder/Colorado.
- WINKLER, E. M. (1981): The effect of residual stresses in stone. - In: ROSSI-MANARESI, R. [Hrsg.]: *The Conservation of Stone II*; *Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna*, **31** (Part A): 3-11, 6 Abb.; Bologna.
- WINKLER, E. M. (1985): A durability index for stone. - In: FÉLIX, G. [Hrsg.]: *Actes Ve Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*, Vol. 1: 151-156, 4 Abb.; Lausanne.
- WINKLER, E. M. (1987): Weathering and Weathering rates of Natural Stone. - *Environ. Geol. Water Sci.*, **9** (2): 85-92, 14 Abb.; New York.
- WINKLER, E. M. (1988): Weathering of crystalline marble. - In: MARINOS, P. G., & KOUKIS, G. C. [Hrsg.]: *The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments, and Historical Sites*; Vol. 2: 717-721, 5 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- WOLF, K. H.; CHILINGAR, G. V., & BEALES, F. W. (1967): Elemental composition of carbonate skeletons, minerals, and sediments. - In: CHILINGAR, G. V.; BISSELL, H. J., & FAIRBRIDGE, R. W. [Hrsg.]: *Carbonate Rocks - Physical and Chemical Aspects*; *Developments in Sedimentology*, **9B**: 23-149, 26 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- WOLFF, A. (1978): Steinkonservierung am Kölner Dom. - *Naturwiss. Rdsch.*, **31** (12): 499-503, 2 Abb.; Stuttgart.
- WTA (Wissenschaftlich-Technischer Arbeitskreis für Denkmalpflege und Bauwerksanierung eV) (1984): Merkblatt Steiner-gängung. - *Bautenschutz + Bausanierung*, **7** (1): 49-51; Köln.
- ZALLMANZIG, J. (1986): Immissionsraten- und Wirkungserhebungen an ausgewählten Orten Europas zur quantitativen Untersuchung des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Werkstein. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: *Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“* (Ludwigsburg, 3. u. 4. April 1986): 135-151, 11 Abb.; Erlangen (Inst. f. Werkstoffwiss. III).
- ZEHNDER, K. (1980): Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen. - In: OEL, H. J. [Hrsg.]: *Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“* (München, 6. u. 7.

März 1980): 6-11; Erlangen.

- ZEHNDER, K. (1982): Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen - Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., **61**: 130 S., 38 Tab., 78 Abb.; Bern.
- ZEZZA, F. (1981): The weathering of the limestone of Trani Cathedral. - In: ROSSI-MANARES, R. [Hrsg.]: The Conservation of Stone II; Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, **31** (Part A): 315-332, 5 Abb.; Bologna.
- ZIEGLER, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe 1990. - [Textbd.:] 239 S., 100 Abb.; [Kartenbd.:] 56 Beil.; Den Haag (Shell). - [2. Aufl.].
- ZIEGLER, W., & KLAPPER, G. (1985): Stages of the Devonian System. - Episodes, **8** (2): 104-109, 9 Abb.; Ottawa.
- ZIEGLER, W., & WERNER, R. [Hrsg.] (1985): Devonian Series Boundaries - Results of world-wide Studies. - Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, **75**: 416 S., 94 Abb., 32 Tab., 31 Taf.; Frankfurt am Main.

Tafel 1

- Fig. 1:** Außenmauer an der Westecke des Turms der Kirche St. Pankratius (Eslohe-Reiste) im Entnahmebereich des Probenkollektivs P. Im Bereich der Ecke (im Bild links) befinden sich nachträglich eingebaute Mauersteine der Generation 2; rechts davon sind ursprünglich eingebaute Mauersteine der Generation 1 mit auffälligen Rissen zu erkennen. (Foto: F.-J. Happe).
- Fig. 2:** Ausschnitt aus der Außenmauer der Kirche St. Pankratius (Eslohe-Reiste) im Entnahmebereich des Probenkollektivs P. Ursprünglich eingebaute Mauersteine der Generation 1 zeigen zahlreiche auffällige Risse. (Foto: F.-J. Happe).
- Fig. 3:** Mauerstein der Generation 1 aus der Außenmauer der Kirche St. Pankratius (Eslohe-Reiste) im Entnahmebereich des Probenkollektivs P. Die Risse bilden ein unregelmäßig polyedrisches Muster und tragen stellenweise schmale Gipskrusten. (Foto: F.-J. Happe).



1



3

2



Tafel 2

- Fig. 1:** Außenseite des Mauersteins K8 (Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 2). Aufsicht, x 0,32.
- Fig. 2:** Außenseite des Mauersteins K22 (Grad der Oberflächenschädigung: 3, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 3). Aufsicht, x 0,35.
- Fig. 3:** Außenseite des Mauersteins K31 (Grad der Oberflächenschädigung: 3, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 4). Aufsicht, x 0,30.
- Fig. 4:** Außenseite des Mauersteins S2 (Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 2). Aufsicht, x 0,36.
- Fig. 5:** Außenseite des Mauersteins S3 (Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 4). Aufsicht, x 0,36.
- Fig. 6:** Außenseite des Mauersteins S15 (Grad der Oberflächenschädigung: 3, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 5). Aufsicht, x 0,36.
- Fig. 7:** Außenseite des Mauersteins E18 (Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 3). Aufsicht, x 0,30.



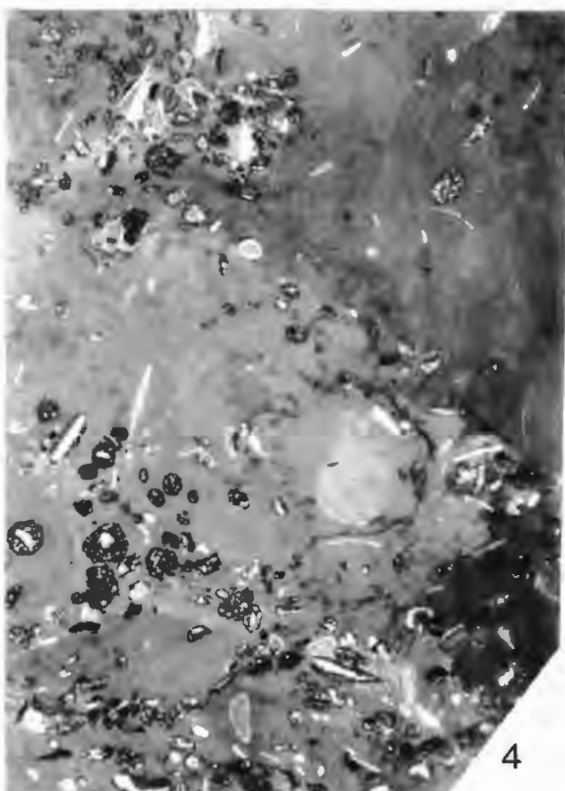
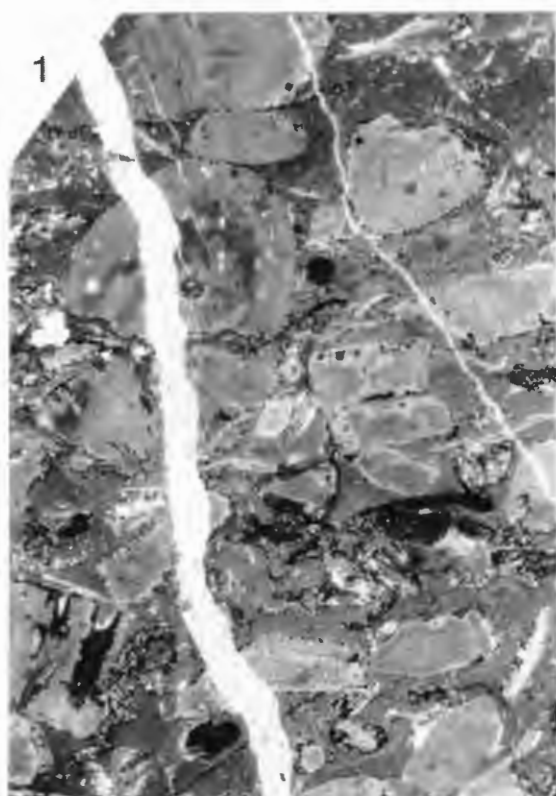
Tafel 3

- Fig. 1:** Außenseite des Mauersteins P30 (Generation 1, Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 2). Aufsicht, x 0,35.
- Fig. 2:** Außenseite des Mauersteins P2 (Generation 1, Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 4). Aufsicht, x 0,30.
- Fig. 3:** Außenseite des Mauersteins P21 (Generation 2, Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 2). Aufsicht, x 0,31.
- Fig. 4:** Außenseite des Mauersteins P29 (Generation 2, Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 3). Aufsicht, x 0,35.
- Fig. 5:** Außenseite des Mauersteins E13 (Grad der Oberflächenschädigung: 3, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 2). Aufsicht, x 0,30.
- Fig. 6:** Außenseite des Mauersteins E11 (Grad der Oberflächenschädigung: 2, Grad der Gefährdung des Gesteinszusammenhaltes: 4). Aufsicht, x 0,37.



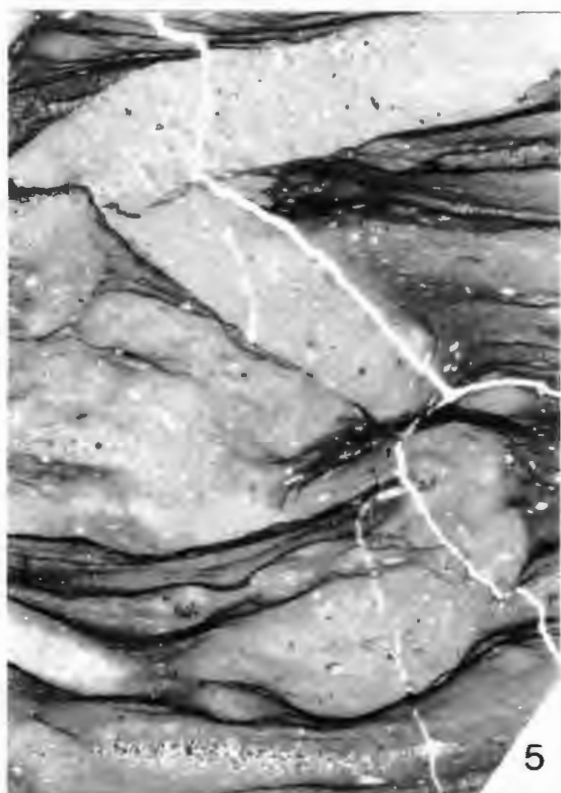
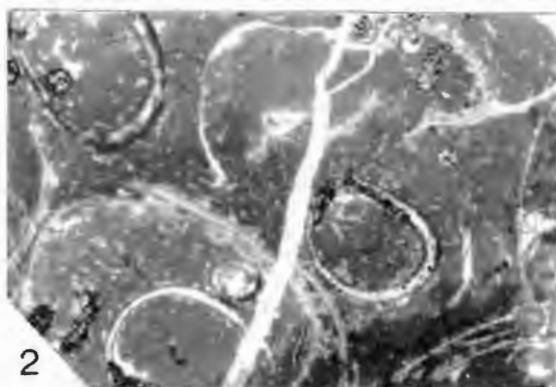
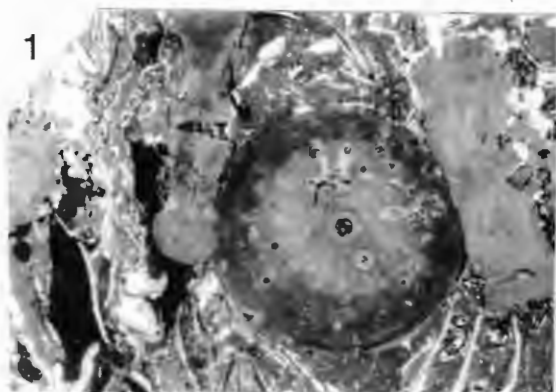
Tafel 4

- Fig. 1:** Mikrofaziestyp 1; Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein S16. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 2:** Mikrofaziestyp 2; Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein S2. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 3:** Mikrofaziestyp 3; Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein S12. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 4:** Mikrofaziestyp 4; Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein S10. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.



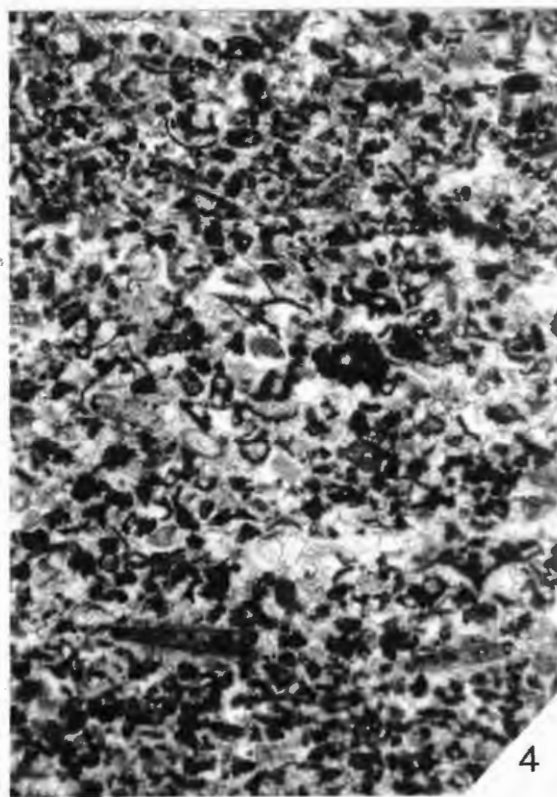
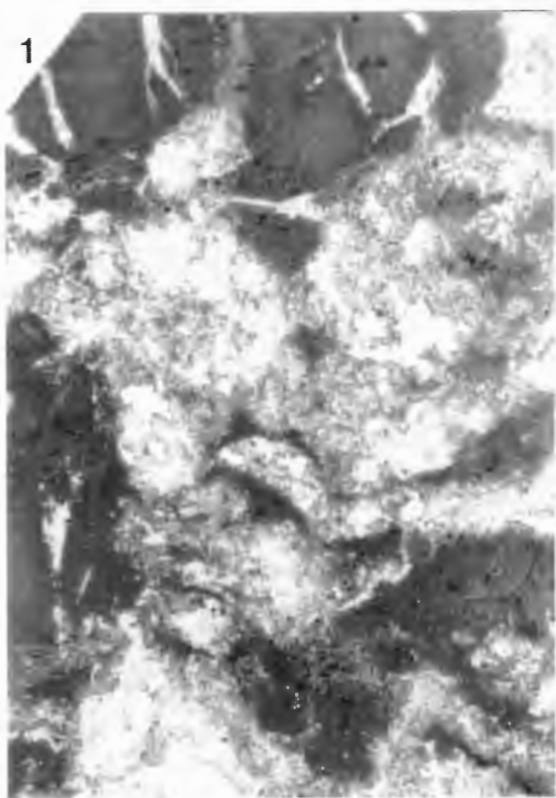
Tafel 5

- Fig. 1:** Quergeschnittenes Crinoidenstielglied mit Bohrgängen von *Talpina gruberi* MAYER 1952; Mikrofaziestyp 3; Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein S8. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 2:** Zahlreiche „Algenschläuche“ in der mikritischen Matrix des Mikrofaziestyps 3; Trochitenkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein S6. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 8 x.
- Fig. 3:** Mikrofaziestyp 5; Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Mauerstein K17. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 4:** Mikrofaziestyp 6; Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Mauerstein K8. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 11 x.
- Fig. 5:** Mikrofaziestyp 7; Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Mauerstein K12. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.



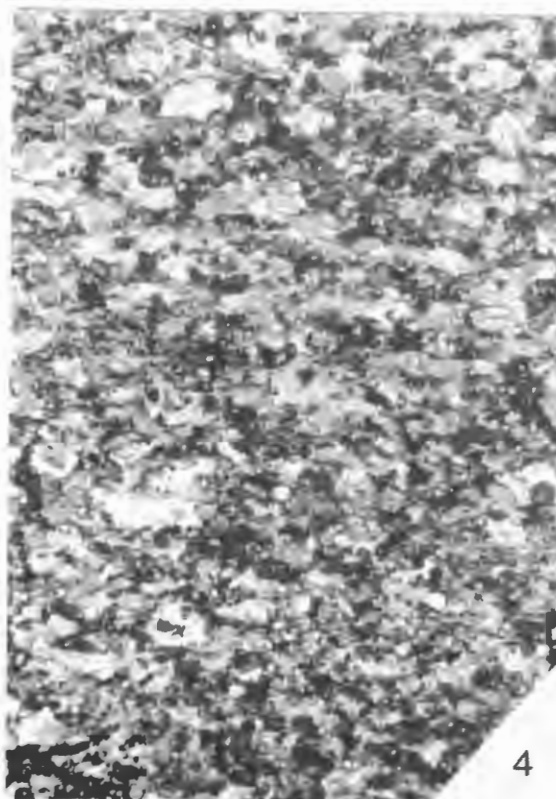
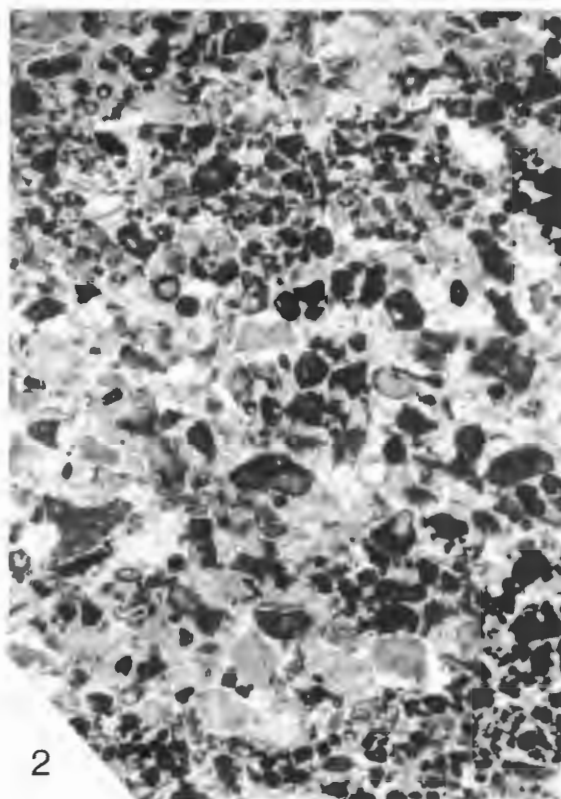
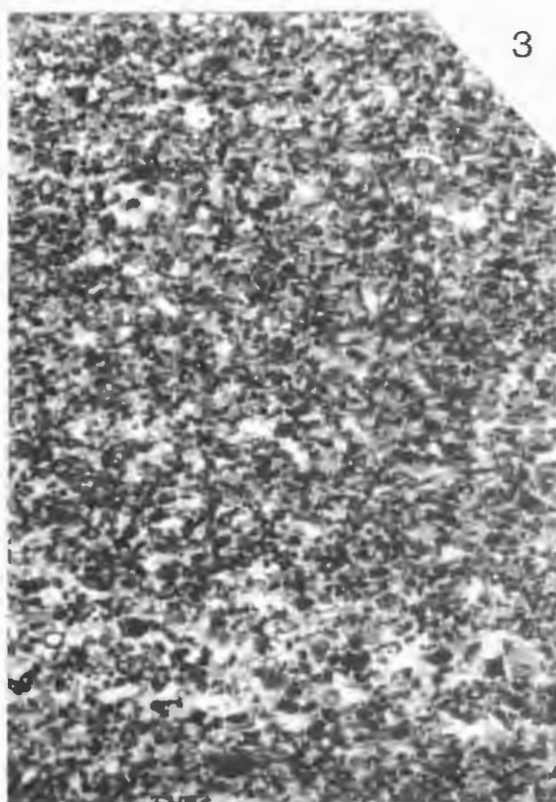
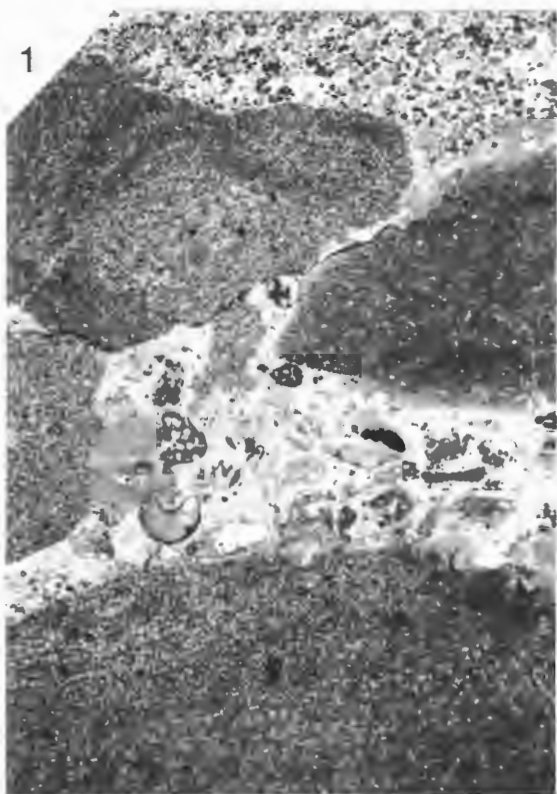
Tafel 6

- Fig. 1:** Mikrofaziestyp 10; Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Probe H1. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 2:** Mikrofaziestyp 8; Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Mauerstein K15. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 3:** Mikrofaziestyp 9; Osnabrücker Wellenkalk des Unteren Muschelkalks. Mauerstein K27. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 4:** Feinkörnige Varietät des Mikrofaziestyps 12; Beisinghäuser Kalk des Devons. Im unteren Teil des Bildes sind zwei längsgeschnittene Tentaculiten zu erkennen. Mauerstein P28. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 18 x.



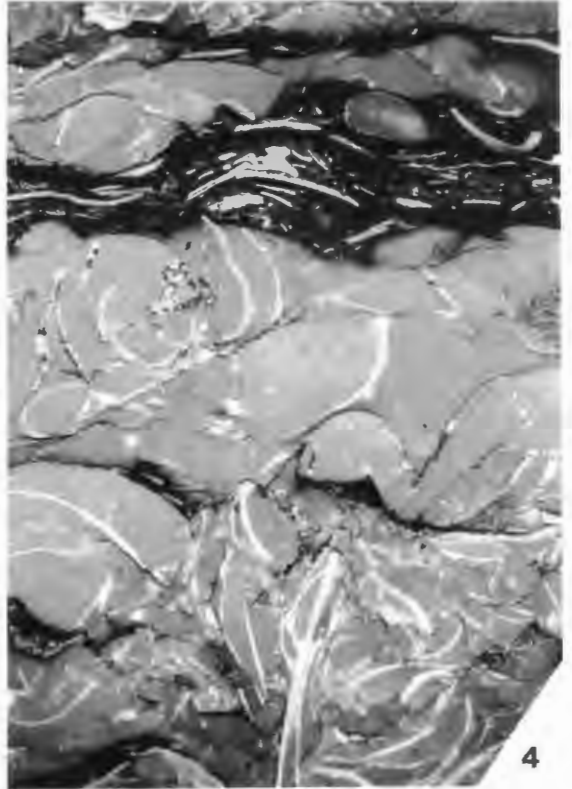
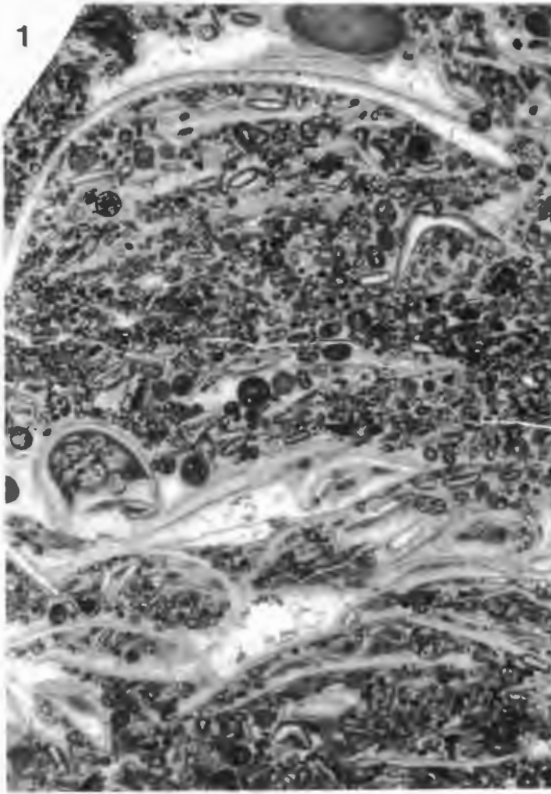
Tafel 7

- Fig. 1:** Mikrofaziestyp 11; Beisinghäuser Kalk des Devons. Mauerstein P15. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 3,5 x.
- Fig. 2:** Grobkörnige Varietät des Mikrofaziestyps 12; Beisinghäuser Kalk des Devons. Mauerstein P1. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 18 x.
- Fig. 3:** Mikrofaziestyp 13; Beisinghäuser Kalk des Devons. Mauerstein P13. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 18 x.
- Fig. 4:** Mikrofaziestyp 14; Beisinghäuser Kalk des Devons. Mauerstein P6. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 18 x.



Tafel 8

- Fig. 1:** Mikrofaziestyp 15; Terebratelkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein E29. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 2:** Mikrofaziestyp 16; Terebratelkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein E10. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 3:** Mikrofaziestyp 17, Normaltyp; Terebratelkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein E6. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 5 x.
- Fig. 4:** Mikrofaziestyp 17, bioturbate Varietät; Terebratelkalk des Oberen Muschelkalks. Mauerstein E5. Dünnschliff-Foto, Vergrößerung 3,5 x.

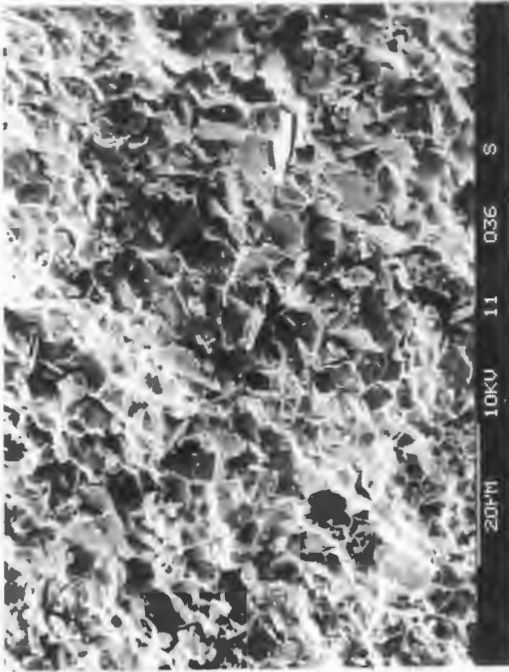


Tafel 9

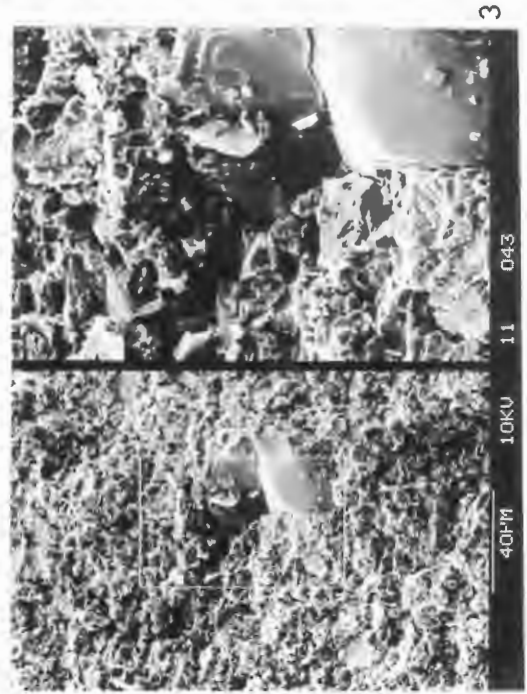
- Fig. 1:** Blockiger Zement aus ziemlich kleinen Sparit-Kristallen. Mauerstein S10. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 17 mm, Bildschirmvergrößerung 1000 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite.
- Fig. 2:** Gefüge eines typischen mikritischen Kalkes (Mikrofaziestyp 7). Zwischen den Mikrosparit-Kristallen verlaufen einzelne Mikrorisse (entlang von Kristallgrenzen). Gelegentlich treten kleine Tonmineral-Blättchen auf. Mauerstein K5. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 18 mm, Bildschirmvergrößerung 1000 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite.
- Fig. 3:** Mehrere Mikrorisse gehen von einem an der lamellenförmigen Spaltbarkeit erkennbaren Tonmineral-Blättchen aus (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Probe B15. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 18 mm, Bildschirmvergrößerung 570 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).
- Fig. 4:** Hohlraumbildung und Gefügebrauchung durch einen größeren Mikroriß im mikritischen Kalk (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Mauerstein K3. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 18 mm, Bildschirmvergrößerung 610 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).



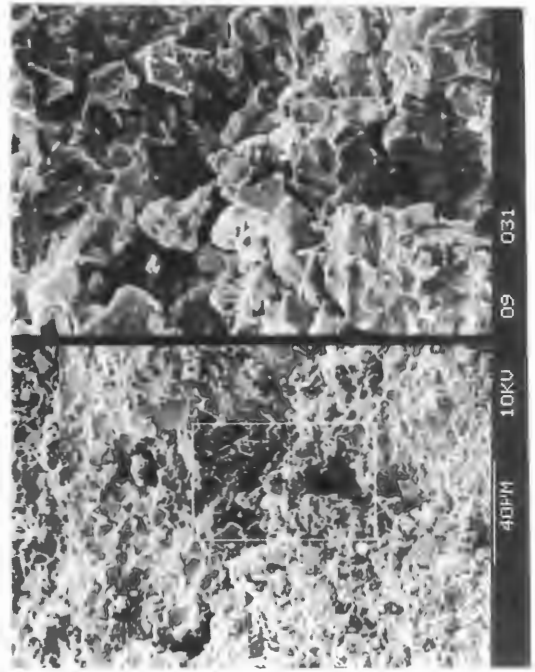
1



2



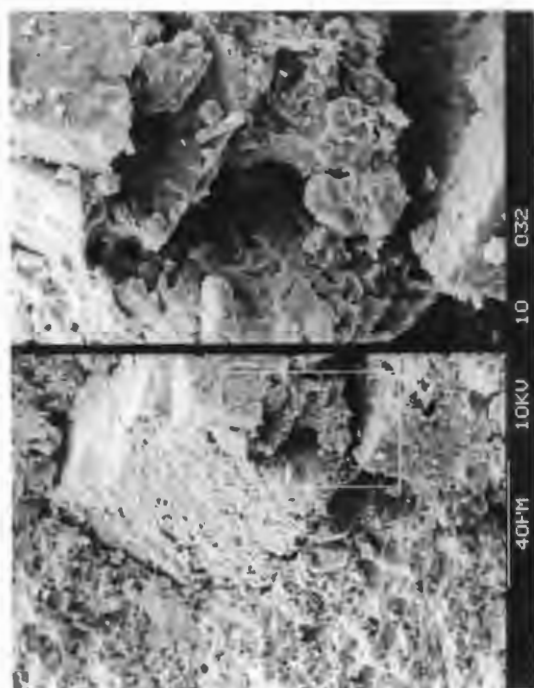
3



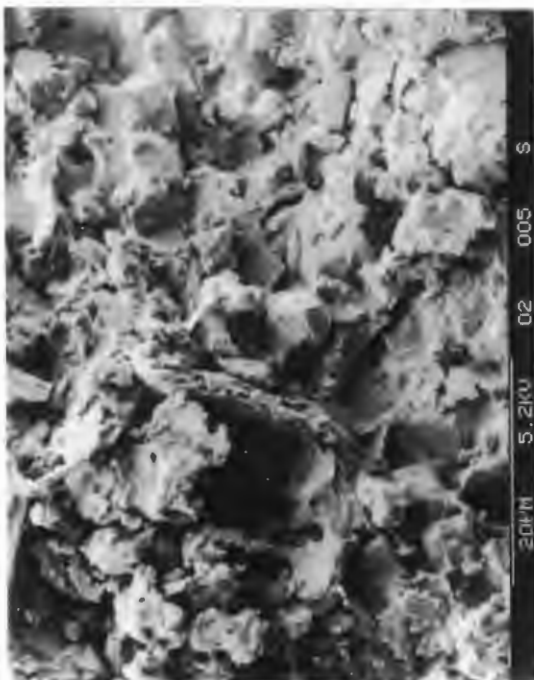
4

Tafel 10

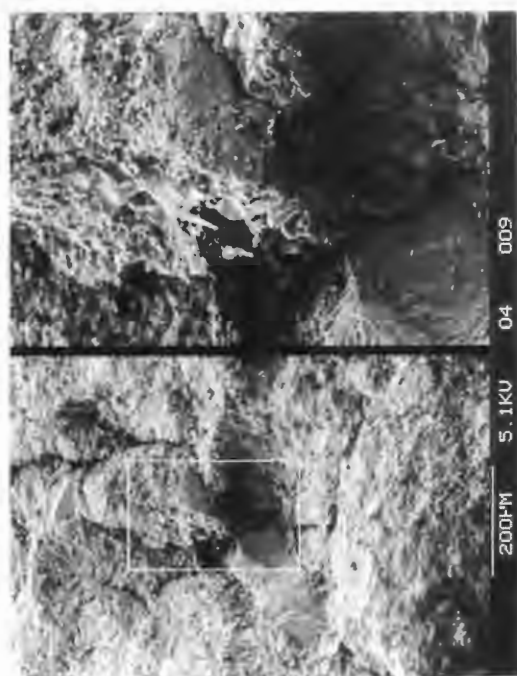
- Fig. 1:** Im Bereich eines Mikrorisses angelöster Kalzitkristall (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Mauerstein S5. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 18 mm, Bildschirmvergrößerung 720 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).
- Fig. 2:** Mehrere Mikrorisse gehen von einem in der Mitte des Bildes senkrecht stehenden Tonmineral-Blättchen aus. Die Risse verlaufen entlang von Kristallgrenzen. Mauerstein K28. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 13 mm, Bildschirmvergrößerung 1500 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite.
- Fig. 3:** Mehrere Mikrorisse gehen von einem großen Kalzit-Einkristall (Crinoidenrest) aus (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Mauerstein S15. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 13 mm, Bildschirmvergrößerung 135 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).
- Fig. 4:** Mikroriß, der von einer mit großen Sparitkristallen erfüllten Druse ausgeht. Der Riß folgt Kristallgrenzen. In seiner Umgebung ist der Kontakt der Mikrospart-Kristalle miteinander gelockert (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Mauerstein K28. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 13 mm, Bildschirmvergrößerung 280 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).



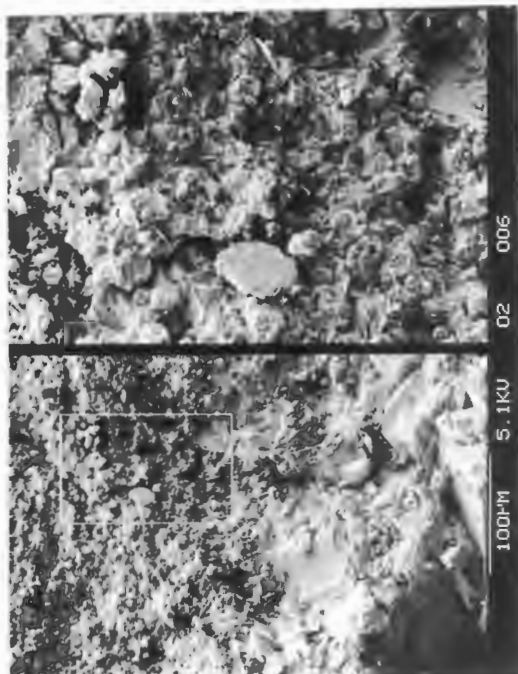
1



2



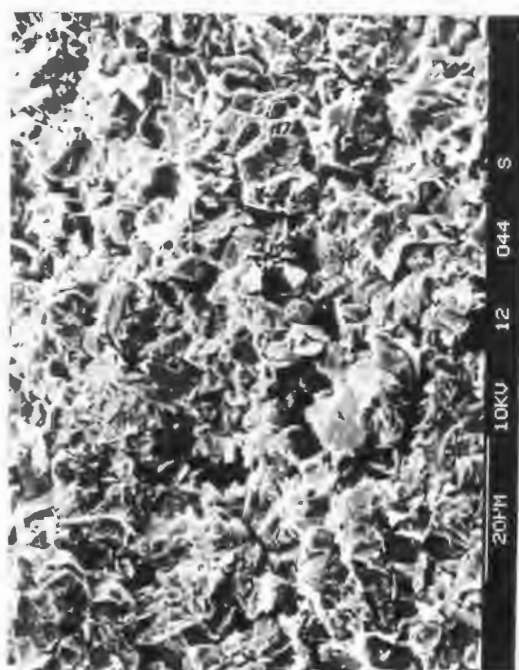
3



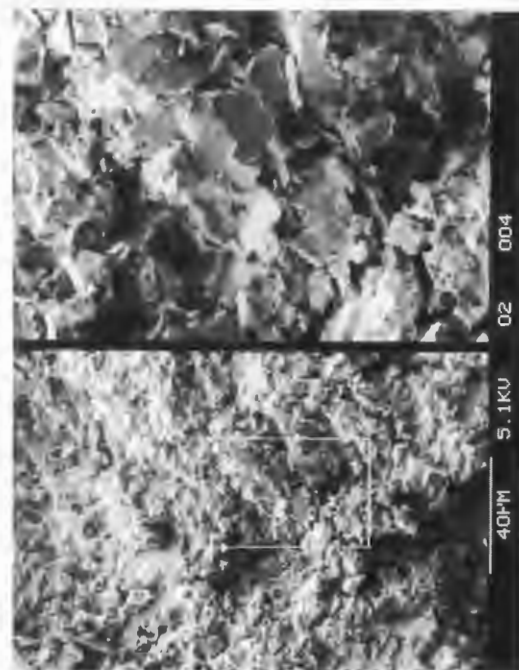
4

Tafel 11

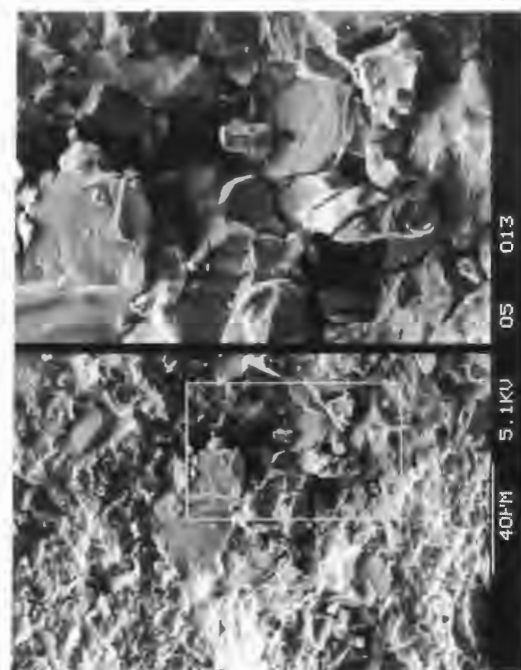
- Fig. 1:** Im Zuge der Dedolomitisierung entstandenes Mosaik aus verzahnten Kalzitkristallen mit sehr unregelmäßigen Kristallgrenzen. Probe B15. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 18 mm, Bildschirmvergrößerung 1000 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite.
- Fig. 2:** Im Zuge der Dedolomitisierung entstandene Kalzitkristalle mit verzahnten, sehr unregelmäßigen Kristallgrenzen (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Mauerstein K28. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 13 mm, Bildschirmvergrößerung 1000 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).
- Fig. 3:** Probe des Mikrofaziestyps 6: Die Mikrorisse sind meist kurz und verlaufen oft durch Kristalle (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Mauerstein K41. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 13 mm, Bildschirmvergrößerung 990 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).
- Fig. 4:** Ein lockeres pflanzliches Geflecht (wahrscheinlich Pilzmyzel) ist in einem Riß gewachsen (linkes Bild Übersicht, rechtes Bild Ausschnittvergrößerung). Mauerstein S16. REM-Sekundärelektronenbild, Arbeitsabstand 22 mm, Bildschirmvergrößerung 56 x. Maßstab siehe Balken an der Unterseite (links weißer Balken, rechts weißer und grauer Balken).



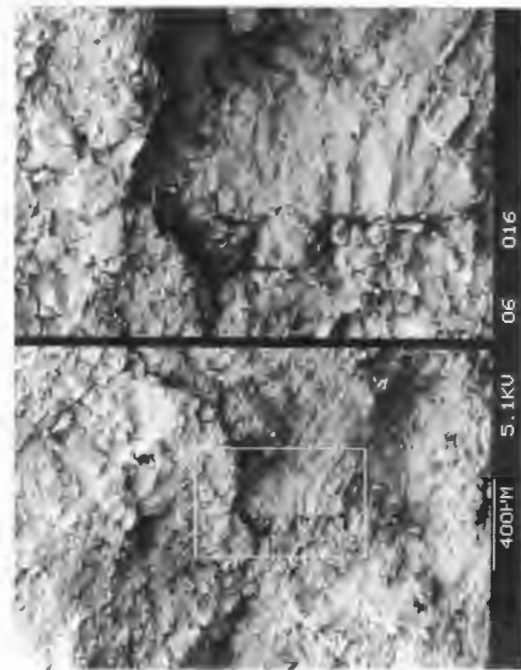
1



2



3



4