

ISBN 3-88314-232-8

# **Forschungsbericht 86**

BUNDESANSTALT FÜR  
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

## **Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**

von Dr.-Ing. Konrad Niesel  
Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz

---

November 1982

100 Seiten, 43 Abbildungen

Abschlußbericht des von der  
Stiftung Volkswagenwerk, Hannover,  
geförderten Forschungsvorhabens I/12 2287

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45  
Telefon 030/8104-1 .Telex 183261 bamb d

Copyright © 1982 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1  
Telefon 0471/46093-95



## Kurzfassung

Die Einschätzung des voraussichtlichen Verwitterungsverhaltens von Werkstein sedimentärer Herkunft bereitet immer noch Schwierigkeiten, zumal Spektrum und Rangfolge der hierfür verantwortlichen Materialeigenschaften und -merkmale weitgehend im unklaren liegen. Hinzu kommen unterschiedliche Expositionsbedingungen durch die jeweilige Lage am Bauwerk. Teilweise sind erst Neuentwicklungen erforderlich gewesen, um ein geeignetes Repertoire an Versuchsmethoden zu schaffen. Anhand einer Auswahl von Diagrammen werden Beurteilungsmöglichkeiten und ihre Grenzen aufgezeigt sowie die Faktoren diskutiert, die die Meßwerte beeinflussen können. Da sich die entsprechenden Vorgänge nur schwer erfassen lassen, empfiehlt sich die Orientierung an einem "allgemeinen Ansatz" für das Verwitterungsverhalten. Einem solchen Modell kann man experimentell mit Hilfe von Verfahren näher kommen, deren Ergebnisse den Hauptbeanspruchungsarten Rechnung tragen sowie von Einflüssen bei der Bearbeitung des Materials und den geometrischen Verhältnissen am Bauwerk unabhängig sind. In diesem Zusammenhang ist die Anwendung des Kristallisationsversuchs mit Natriumsulfat, der einen unmittelbaren Zugang zum Verwitterungsgeschehen gestattet, von besonderer Bedeutung. Auch einige porenraumbezogene und mechanische Merkmale und ihre Verknüpfungen untereinander erweisen sich hier als nützlich. Erste Resultate ermutigen dazu, den eingeschlagenen Weg weiterzugehen, um schließlich eine objektive Grundlage für eine "relative" Bewertung der verschiedenen Bausteinarten schaffen zu können.

Contribution to quantitative characterization of weathering  
behaviour of natural building stone related to its structure

## Abstract

The judgement of the prospective weathering behaviour of stone having a sedimentary origin brings still about difficulties, particularly, because extent and ranking order of material characteristics responsible for that are almost incomprehensible. Effective are also different exposure conditions caused by the local situation in the building. In some cases a development of new methods was previously necessary in order to offer a suitable selection of test techniques. By means of diagrams selected, assessment possibilities and their limits are pointed out and the factors discussed which are of influence on the measured values. Since the corresponding processes can only be difficultly comprehended, an orientation at a "general approach" to the weathering behaviour seems to be useful. To such a model one may come near experimentally by means of methods the results of which take into account the main kinds of stress and are independent from material processing artefacts and geometrical circumstances at the building. Of particular importance is the application of the sodium sulphate crystallization test which permits a direct access to the weathering process. Several characteristics related to pore space, mechanical strength, and to the connections between them which seem to be useful, too. First results encourage to proceed the present direction in order to establish finally an objective basis for a "relative" judgement of the various types of building stone.

# Contribution à la caractérisation quantitative du comportement de pierres en oeuvre naturelles par leurs données structurales

## Sommaire

L'estimation du comportement probable à l'altération, de la pierre de taille d'origine sédimentaire, fait encore des difficultés, d'autant plus que le volume et la hiérarchie des valeurs caractéristiques en étant responsables, sont largement confus. A cela s'ajoutent des conditions de sollicitation localement différentes à cause de la situation respective sur le bâtiment. Il a été d'abord nécessaire, en partie, de développer de nouveaux procédés d'essai afin de pouvoir présenter un répertoire approprié de méthodes. L'on a mis en évidence des possibilités de jugement et leurs limites. L'on a aussi discuté sur les facteurs influençant les valeurs mesurées. Les processus correspondants ne se laissant saisir que difficilement, il est recommandable de s'orienter d'après une "formulation générale" pour le comportement à l'altération. L'on peut se rapprocher d'un tel modèle par voie expérimentale au moyen de méthodes dont les résultats, tenant compte des principales sortes de sollicitation, sont indépendants d'influences lors du façonnement du matériau et des circonstances géométriques sur le bâtiment. A ce propos, l'application de l'essai de cristallisation au sulfate de sodium, permettant un accès immédiat aux processus d'altération, est d'importance particulière. De même, quelques caractéristiques mécaniques et reliées à l'espace poreux, ainsi que leurs liaisons mutuelles, se montrent ici utiles. Des premiers résultats encouragent à suivre le chemin pris jusqu'ici dans le but de produire finalement des bases objectives pour une évaluation "relative" des différents types de pierre en oeuvre.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. <u>Einleitung</u>	1
2. <u>Verfahren zur Materialkennzeichnung</u>	4
2.1 <u>Charakterisierung von Bausteinen unter dem Aspekt der Verwitterung</u>	4
2.2 <u>Chemische Zusammensetzung und Phasenaufbau</u>	7
2.2.1 Mineralogische und chemische Analysen	7
2.2.2 Röntgenanalyse im Rasterelektronenmikroskop	8
2.3 <u>Porenraumbezogene Eigenschaften und Merkmale</u>	10
2.3.1 Porosität und Wasseraufnahme	10
2.3.2 Kapillare Wasseraufnahme	16
2.3.3 Porengrößenverteilung (Quecksilber-Porosimeter)	19
2.3.4 Luftpermeabilität	24
2.3.5 Spezifische Oberfläche (Gasadsorption)	26
2.4 <u>Festigkeitseigenschaften</u>	27
2.4.1 Druckfestigkeit	27
2.4.2 Oberflächenhärte (Eindruckverfahren)	29
2.4.3 Verschleißprüfung (Schleifscheibe nach Böhme)	31
2.4.4 Oberflächenverschleißprüfung (BAM-Verfahren)	32
2.5 <u>Simulation der Verwitterung</u>	34
2.5.1 Frosttauwechselversuch	35
2.5.2 Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat (mit BAM-Auswertverfahren)	38
2.5.3 Bewitterung in SO <sub>2</sub> -Atmosphäre bei wechselnder Luftfeuchte (BAM-Verfahren)	42
3. <u>Untersuchungsergebnisse</u>	47
3.1 <u>Aspekte bei Auswertung und Darstellung</u>	47
3.2 <u>Literaturdaten und ihre Übertragbarkeit</u>	54
3.3 <u>Die Ergebnisse und ihre Deutung</u>	56
3.3.1 Porenraumbezogene und mechanische Merkmale als Beurteilungskriterien	56
3.3.2 Kristallisationsversuch als Kriterium	66
3.3.3 Elementverteilungsanalyse von Verwitterungsprofilen	70
3.3.4 Weniger signifikante Merkmale	74
4. <u>Schlußfolgerung und Ausblick</u>	77
5. <u>Literatur</u>	83



Eigentlich ist alles nichts,  
Heute hält's, und morgen bricht's.

(Aus Theodor Fontanes Gedicht  
„Ja, das möcht' ich noch erleben“)

## 1. Einleitung

Da Naturwerksteine sedimentären Ursprungs in der Regel maschinell und steinmetzmäßig leichter zu bearbeiten sind, haben sie eine weite Verbreitung gefunden und sind daher auch für den restaurativen Ersatz von Interesse. Im Bemühen, geeignete Kriterien zur Beurteilung ihres voraussichtlichen Verwitterungsverhaltens zu schaffen, stößt man wegen der komplexen Einflüsse am Bauwerk noch auf erhebliche Schwierigkeiten. Diese rühren nicht etwa allein daher, daß eine Simulation der "in der Natur" wirksamen Parameter nur begrenzt möglich ist oder bei den ablaufenden Prozessen der Zeitfaktor durch Intensivierung anderer Teilumstände beeinflusst wird. Das entscheidende Moment stellt vielmehr die vergebliche Suche nach einem "Standard" dar, an dem man die Resultate des Verwitterungsfortschritts und die eines entsprechenden Laborversuchs messen kann. Warum das so ist, mag das folgende Beispiel erläutern: Betrachtet man die Verwitterungserscheinungen an einem stilgemäß stark gegliederten gotischen Sakralbau, so ist, selbst unter der - hypothetischen - Voraussetzung einer vollkommenen Gleichartigkeit des an seiner Außenseite verwendeten Werksteins, mit lokal verschiedenartigen Schadensbildern zu rechnen. Diese würden nicht nur mit der Orientierung zu den Quellen gas- und staubförmiger Emissionen, von den himmelsrichtungsabhängigen Witterungseinflüssen wie Sonneneinstrahlung, Niederschlagsangebot und Hauptwindrichtung oder den damit verknüpften Transportvorgängen im Porenraum des Materials zusammenhängen, sondern darüber hinaus mit der Anordnung und Geometrie der einzelnen Bauteile und den dadurch bewirkten, oft in kleinen und kleinsten Bereichen unterschiedlichen klimatischen Bedingungen. Einige Autoren haben diese Verhältnisse unter dem Schlagwort "Mikroklima" zusammengefaßt. Im Klartext heißt das: Der an irgendeiner Schadensstelle entnommenen Probe entspricht zwangsläufig ein willkürlich herausgegriffenes und daher zufälliges Beanspruchungsstadium des jeweiligen Gesteins, das aber keineswegs von repräsentativem Charakter sein muß. Selbst wenn man sicher sein könnte, daß für den angetroffenen Zustand der größtmögliche Zerfallsfortschritt an besonders exponierter Stelle oder aber ein mittleres Materialverhalten verantwortlich ist, müßte offenbleiben, inwieweit man Rißentstehung, schichtiges Ablösen und Absanden bzw. irgendeine andere erkennbare Beeinträchtigung des Oberflächenbereichs bis in eine bestimmte Tiefe (92) oder bereits das Eindringen von Sulfat als Beurteilungsgrundlage für die Verwitterung heranziehen sollte. Letztlich stellt sich die Frage, ob man bei derartigen Schäden überhaupt auseinanderhalten kann, in welchem Maße diese von genetisch bedingten Eigenheiten abhängen bzw. durch künstliche Veränderungen des Gefüges etwa infolge von steinmetzmäßiger Oberflächenbearbeitung oder Bewegungsvorgängen im Bauwerk vorgeprägt worden sind. Das Problem, wie man bei solchen Vorbedingungen nun eigentlich den Ausdruck "Beanspruchung am Bauwerk" definieren muß, bleibt somit wohl auch künftig ungelöst. Daher ist es noch nicht möglich gewesen, eine Lösung des "allgemeinen Ansatzes" für das Verwitterungsverhalten eines Baustoffs zu finden. Unter diesem Begriff soll ein Modell verstanden

werden, das alle denkbaren Faktoren einbezieht, auf die sich das voraussichtliche "Schicksal" des Gesteins zurückführen läßt. Damit entspricht es gleichsam einer die unterschiedlichen Merkmale umfassenden Darstellung und spiegelt so den realen Sachverhalt wider. Zu einer derart komplexen Aussage hat man gegenwärtig aber noch keinen Zugang und kann sie daher prüftechnisch auch nicht "herbeizwingen", zumal hierfür geeignete Ergebnisse von Material zu Material durch sehr unterschiedliche Einflußgrößen geprägt sein dürften. Bedingung wäre allerdings auch, daß sich die entsprechenden Werte von der Geometrie des Werksteins sowie dessen handwerklicher Bearbeitung und Lage am Bauwerk - demnach also von präparativen und ortsspezifischen Besonderheiten - als weitgehend unabhängig erweisen. Dieser zunächst nachteilig erscheinende Befund läßt andererseits aber wiederum Spielraum für die Beurteilung der Verwitterbarkeit nach "individuellen" und damit im Einzelfall besser geeigneten Kriterien. Außerdem braucht man sich nicht an ein festes Instrumentarium zu klammern und kann die entsprechenden Prüfungen nach den Gegebenheiten bzw. dem Baustoff auswählen. Ursprünglich hat die Absicht bestanden, einen regelrechten zweiten Teil an die Arbeit "Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeloxidhaltiger Atmosphäre-Literaturdiskussion" - jedoch mit dem Zusatz "Experimentelle Ergebnisse" - anzufügen (vgl. (145)). Ein nachträglicher Verzicht hierauf läßt sich leicht erklären: Im Zuge der Literaturrecherche und weiterer Untersuchungen ist es mehr und mehr offenkundig geworden, daß man das Verwitterungsverhalten eines Gesteins nicht einfach mit einem beliebigen Schadensfaktor ohne Berücksichtigung der jeweils anderen in Beziehung bringen darf, weil die Wirkungen von verschiedenartigen wirksamen Medien, Expositionsbedingungen und Eigenheiten des Materials einander überlagern. Für den Fall einer Imprägnierung mit Steinschutzmitteln würde hinzukommen, daß material- und verfahrensbedingte Eigenschaften schließlich noch mit lokalen Zufälligkeiten in Wechselwirkung stünden. Aufmerksam müßte ebenso das Langzeitverhalten solcher Konservierungsmaßnahmen verfolgt werden. Das macht deutlich, warum derart verwickelte Systeme sich nur allzu häufig einer wissenschaftlich fundierten Klärung entziehen. Hier liegt auch der wesentliche Grund dafür, daß es beim gegenwärtigen Erkenntnisstand eher zweckmäßig erscheint, die Chancen für das Verständnis der Zusammenhänge durch Reduktion der untersuchten Parameter auf eine Mindestanzahl zu verbessern. Demzufolge ist das vorliegende Programm absichtlich auf den restaurativen Steinersatz beschränkt worden.

Als Proben für die experimentellen Untersuchungen wurden rund 40 vorzugsweise an Monumentalbauten bzw. zur Fertigung von Skulpturen verwendete Sedimentgesteine aus dem süddeutschen Raum herangezogen. Bei mehr als der Hälfte davon handelt es sich um carbonatarme bis -freie Sandsteine, bei etwa einem Viertel um Kalksteine unterschiedlicher Genese. Der Rest sind carbonatgebundene Sandsteine, meist vom Molassetyp. Gerade bei der Verwitterung derartigen Materials können schwefeloxidische Luftverunreinigungen eine wesentliche Rolle spielen. Es gibt aber nur einige wenige unter kalkhaltigen Sandsteinen oder Kalkmörteln anzutreffende Baustoffe, bei denen die Schwächung des calcitischen Kontaktbindemittels infolge des Übergangs in Sulfat den strukturellen Zusammenhalt unmittelbar beeinträchtigt. Abgesehen davon ist das Verhalten in SO<sub>2</sub>-Atmosphäre wohl weitgehend mit den üblichen, infolge Volumenveränderung auf Gefügeschwachstellen einwirkenden Mechanismen wie Salz- und Frostsprengung in Zusammenhang zu bringen, für die allerdings eine Umlagerung des Bindemittels etwa im Sinne einer Krustenbildung

u. U. erst die entsprechenden Voraussetzungen liefert. Allgemein erweist es sich als zweckmäßig, neben der Klärung der physikalischen und chemischen Prozesse signifikante Gesteinsmerkmale zu ermitteln, d. h. einen "Katalog" von Untersuchungsverfahren zu schaffen, deren Ergebnisse letztlich eine Vorhersage des lokalen Verhaltens am Bauwerk ermöglichen, wobei man gleichfalls eine Simulation solcher Vorgänge im Labor versucht. Außerdem müßte - auch mit Hinsicht auf die zunehmende Verwendung von Konservierungsmitteln - festgestellt werden, welche Charakteristika eines Bausteins bei der Einwirkung äußerer Einflüsse speziell an seinem Einsatzort bestimmend sind. Um diesem Ziel näher zu kommen, würde es sich anbieten, ein und dasselbe Gestein - im bruchfrischen Zustand, entnommen im Oberflächenbereich von Gebäuden bzw. künstlich bewittert - zu kennzeichnen und die erhaltenen Daten miteinander zu vergleichen. Die Auswahl hat sich aber naturgemäß auf solches Material beschränken müssen, die bei der Probenahme zugänglich gewesen sind.

Eine exakte "Gleichstellung" erwies sich in der Regel als schwierig oder gar nicht durchführbar. Häufig ließ sich zu einem am Bauwerk verwitterten Gestein kein entsprechendes frisches Material aus den gegenwärtig betriebenen Steinbrüchen beschaffen, so daß man sich mit der Kernzone des Bauteils - nach Entfernen der angewitterten Außenschicht - behelfen mußte. Ferner war es meist nicht möglich, bei der Ortsbesichtigung etwas Verbindliches über Herkunft und Einbaualter des Werksteins zu erfahren. Auch stand manchmal zu wenig Material zur Verfügung, als daß es für alle vorgesehenen Versuche ausgereicht hätte, oder es konnte bzw. durfte am Bauwerk nicht entnommen werden. In zahlreichen Fällen wurden schließlich Gesteine herangezogen, die zwar der für die Einwirkung von SO<sub>2</sub> charakteristischen Sulfaterstörung unterlegen waren, deren für die chemischen Reaktionen erforderlicher Kalkgehalt jedoch von außen stammte, weshalb das bruchfrische Äquivalent bei der künstlichen Bewitterung notwendigerweise ein völlig anderes Verhalten zeigte. Unter den genannten Einschränkungen, die selbst bei "sicheren" Materialeigenschaften und Simulationsmethoden eine Rolle spielen, sind spezifische Vorzüge bestimmter Kennwerte demnach erst durch geeignete Auswahl richtig nutzbar zu machen. Als Kriterium für den Aussagegehalt eines interessierenden Merkmals könnte man beispielsweise ansehen, inwieweit eine Meßwertstreuung verfahrenstypisch ist oder durch materialbedingte Inhomogenitäten beeinflusst wird, und ob diese beiden sich deutlich genug voneinander unterscheiden lassen.

Soll das vorliegende Arbeitsgebiet prüftechnisch einigermaßen abgedeckt werden, muß man sich darüber Rechenschaft geben, inwieweit die bekannten Methoden für die gestellte Aufgabe überhaupt in Frage kommen. Eine maßgebliche Rolle spielt hier die unterschiedliche Rangfolge der Ergebnisse hinsichtlich Aussagefähigkeit und universeller Anwendbarkeit, Erprobungsgrad und Zuverlässigkeit. Maßstäbe für eine entsprechende Bewertung gelten jedoch gleichermaßen für genormte Verfahren und ihre Modifikationen sowie nicht standardisierte Techniken einschließlich Neuentwicklungen, auch wenn diesen eine allgemeine Anerkennung bisher versagt geblieben ist. Wie sich im Anwendungsfall gezeigt hat, ist die Bedeutung der jeweiligen Methode aber keinesfalls immer mit einer solchen Rangabstufung in Übereinstimmung zu bringen. Somit besteht also eine wesentliche Aufgabe der Untersuchungen darin, bei Ausnutzung der verfügbaren apparativen Gegebenheiten



erfolgversprechende Kenndaten aufzuspüren und zu wichten. Hierbei ist weniger eine Vertiefung ins Detail beabsichtigt; vielmehr sollen die großen Linien herausgearbeitet werden.

## 2. Verfahren zur Materialkennzeichnung

### 2.1 Charakterisierung von Bausteinen unter dem Aspekt der Verwitterung

Aufgrund langjähriger Erfahrungen hat F. Rathgen (163) der Auswahl von geeignetem Gestein für den restaurativen Ersatz in der Regel eine größere Bedeutung beigemessen als dessen nachträglicher Behandlung mit Imprägnierungsmitteln. Von A. Stois und G. Claus (194) wird diese Auffassung gestützt: "Der beste Steinschutz liegt bestimmt in der Beschaffenheit des Steins selbst, in seiner 'Wetterbeständigkeit'". Die Anhänger einer Überführung von Originalplastiken in die Museen bei gleichzeitiger Substitution durch Kopien sind vom Konservieren nur allzu häufig durch offensichtliche Mißerfolge mit den porenverengenden bzw. -schließenden Maßnahmen abgeschreckt worden. Dies kann sogar in der Aussage gipfeln, es "würde eine nochmalige Behandlung mit Steinerhaltungsmitteln in kurzer Zeit die völlige Zerstörung bedeuten" (15). Solche Argumente fordern natürlich die besondere Berücksichtigung der materialspezifischen Parameter bei einer Auswahl der für einen Ersatz in Frage kommenden Gesteine.

Mit der Darstellung der zur Kennzeichnung herangezogenen Methoden ergibt sich für eine Beurteilung des Verwitterungsverhaltens ein zweifaches Problem hinsichtlich ihres Geltungsbereichs: Einmal ist da der Bezug auf das gesamte Gestein einschließlich der genetisch bedingten Diskontinuitätsflächen (z. B. Klüfte, Verwerfungen oder Schieferung) und andererseits auf die einzelnen in sich geschlossenen d. h. ungestörten, allenfalls von Sedimentationsflächen charakterisierten Blöcke. Hiermit ist Material gemeint, das aus einer mehr oder weniger regelmäßigen Anordnung von natürlichen Mineralaggregaten besteht, deren Eigenschaften von den physikalischen Besonderheiten der einzelnen Bestandteile und der Art ihrer Bindung untereinander abhängen (41). Auf in diesem Sinne homogene Bereiche sollen sich die Untersuchungen im wesentlichen beschränken. Werksteine zeigen nun eben einmal Neigung zu raschem Wechsel von Phasenbestand, Gefüge und damit Porosität auf kürzester Entfernung. Äußerlich nicht ohne weiteres erkennbare Unstetigkeiten kommen hinzu. Manchmal führt das notgedrungen zu Unsicherheiten bei der Bewertung der Repräsentativität der einzelnen Proben, deren lokale Anordnung in ein und demselben Gesteinsblock infolge Zusammentreffens mehrerer Spezifika bereits Probleme aufwerfen kann. Hilfreich für das Verständnis solcher auch mechanisch und hygrisch wirksamen Anisotropien mag u. a. die Feststellung von J. W. Walsh und W. F. Brace (206) sein, daß isometrische Poren die Materialparameter ganz andersartig beeinflussen als etwa Mikrorisse, die unter hinreichender Belastung sogar weitgehend zusammengedrückt und dadurch "wirkungslos" werden können. Aus den genannten Gründen fällt naturgemäß der Probenahme eine wesentliche Rolle zu.



Zur Frage der Vergleichbarkeit von Proben aus einem Vorkommen schreibt bereits H. H ö f e r (94): "Jeder Sandstein ändert bankweise seine chemische Zusammensetzung im geringeren oder größeren Grade, je nachdem das Verhältniß zwischen Sand und Bindemittel schwankt; auch letzteres ist in seiner Zusammensetzung nicht vollends gleichbleibend, so daß es gewagt ist, einen Stein aus dem Rudolfsbau in Wien (1294), oder aus dem Pulverthurme (1460) mit einem solchen aus dem schönen Thore des Heidelberger Schlosses (1651) oder aus dem jetzigen Steinbruche zu vergleichen". Oder aber nach der Lesart B. H e r t e l s (90): Mit der "Untersuchung des in Ansicht genommenen Materials durch einen Fachgelehrten auf all die Verhältnisse, von denen zu vermuten ist, daß sie von Einfluß auf die Widerstandsfähigkeit des Gesteins gegen die Angriffe der Verwitterungserreger sein können, ist streng genommen nur die Gewähr für die Beschaffenheit des Materials gegeben, das zur Zeit der Untersuchung in den Steinbrüchen anstand. Dafür, daß die Steine, die bei weiterem Betriebe des Bruches gewonnen werden, die gleichen Eigenschaften haben, kann selbst der bedeutendste Fachgelehrte keine Bürgschaft leisten".

Auch die durch Lagerung im Steinbruch oder Bearbeitung verursachten Veränderungen sowie die von der Feuchtigkeitswanderung bestimmten Vorgänge innerhalb des Mauerwerks prägen dieses Bild. So kann an der Grenze zwischen Mörtel und Baustein nicht nur eine Angriffsfläche für bevorzugte Feuchtigkeitszirkulation, sondern auch - hervorgerufen durch die Unterschiede in mechanischer Festigkeit und thermischem Ausdehnungskoeffizienten oder wegen ungünstiger hygrischer Verhältnisse im Zusammenhang mit dem Mörtelauftrag - eine Diskontinuität entstehen, längs der sich ein Spannungsabbau als unregelmäßig fortschreitende Haftverminderung bzw. Ablösung äußert. Zu vergegenwärtigen hat man sich stets, daß derlei meist senkrecht zur Bauwerksaußenseite verlaufende Inhomogenitätszonen letztlich auch das begrenzungsparallele eigentliche "Verwitterungsprofil" (vgl. Abschnitt 5 von (145)) beeinflussen.

Zieht man alle diese Faktoren in Betracht, so läßt sich der im Grundcharakter schichtartig vorgetragene Angriff durch aufsteigende Bodenfeuchtigkeit oder atmosphärische Agenzien als Quelle zusätzlicher Komplikationen ansehen. Bedacht werden muß dabei ein weiteres Phänomen, das die Ergebnisse u. U. merklich verfälschen kann: Es ist dies die zumindest an dekorativen Formstücken eines Gebäudes häufig unvermeidliche, meist latente Beeinträchtigung der Oberflächenzone infolge Lösungstransports. Hier sind Heterogenitäten besonders dann wirksam, wenn nur Proben geringer Abmessungen entnommen werden dürfen, ohne daß sich die angewitterte Schicht - mangels Masse - vor der Prüfung entfernen läßt. Sind die Entnahmestellen auch noch über eine größere Bauwerksfläche verstreut, wird die Möglichkeit vervielfacht, ungewollte Meßwertstreuungen systematisch zu erzeugen. Demnach wäre es ideal, wenn man über blockförmige Probestücke ausreichender Größe verfügte, wobei das Gestein in möglichst "frischem" Zustand vorliegen, d. h. also dem Bauwerksinneren zugekehrt sein sollte. Zwangsläufig gilt es, in diesem Sinne ungeeignetes Material auszusondern.

Zur Einschätzung von etwaigen Fehlerquellen bei der Entnahme ist schließlich in Rechnung zu stellen, daß "minderwertigere" Gesteinspartien oft verworfen werden, weil sie z. B. nicht den für eine Dimensionierung der Proben erforderlichen Zu-

sammenhalt aufweisen, man also durch eine solche willkürliche Aussonderung jedes Prüfergebnis - damit aber die Materialqualität - unbewußt "aufbessert" (vgl. (181)). Diskrepanzen zwischen im Labor und in situ gewonnenen Resultaten finden hier häufig ihre Ursache. Für die Präparation der Proben ist schließlich zu beachten, daß nicht unnötige Veränderungen wie ein "Zuschmieren" der Poren die Oberflächeneigenschaften zusätzlich und unkontrollierbar beeinflussen. Daher sind die ebenen Flächen der Probekörper grundsätzlich nur mit Hilfe von einfachen Sägeschnitten hergestellt worden.

Während sich der Verwitterungsgrad einiger Natursteine offenbar zufriedenstellend z. B. anhand der Modalanalyse charakterisieren läßt (40), scheinen derartige Mittel für eine allgemeine Bewertung des voraussichtlichen Materialverhaltens nicht immer erfolgreich. Über das anspruchsvolle, im wesentlichen petrografisch gestützte System J. H i r s c h w a l d s zur Bewertung der Bausteine (91) bei gleichzeitiger Anwendung analytischer und deskriptiver Daten kann man im Hinblick auf einen prognostischen Aussagewert unterschiedlicher Meinung sein. Selbst wenn man sein Versagen für das Verhalten unter SO<sub>2</sub>-Einwirkung einmal ausklammert, bleiben einige Fragen offen. So hat es etwa den Anschein, als ob hier zwar Perfektions- bzw. Komplettierungsbestreben zu einer minuziösen Klassifikation verhelfen, diese jedoch hinsichtlich ihrer Wichtung die verschiedenen Materialparameter kaum gebührend zu berücksichtigen imstande ist. Auch ist wenigstens in einigen Fällen ein Aspekt von H i r s c h w a l d s System, nämlich die Vergleichbarkeit von Werksteinen an mehreren hundert Jahren alten Bauten mit sehr viel später aus demselben Steinbruch gewonnenen Proben, in Frage zu stellen (79). Überhaupt dürfte die Exaktheit einer entsprechenden Einordnung der Gesteine ganz wesentlich von der Bewertung ihrer Eigenschaften und Merkmale aufgrund der Klassifikation und durch den Beurteilenden abhängen. Derartige Bedenken sollte man sich vergegenwärtigen und bei der Deutung der Befunde berücksichtigen. Ebenso müßte einer sich trotz scheinbarer Eleganz der Darstellung nur allzu leicht anbietenden Verabsolutierung entgegengewirkt werden. Die gewonnene Erfahrung liefert jedenfalls einmal mehr Grund dafür, daß eine zu sehr auf eine einzige Beanspruchungsart zugeschnittene Beurteilungsgrundlage als Kriterium im Sinne des "allgemeinen Ansatzes" für das Verwitterungsverhalten ausscheidet. Bei der Abschätzung der Aussagekraft der einzelnen relevanten Parameter ist erneut deutlich geworden, daß hierfür weit weniger der Phasenaufbau als die Gefügemerkmale bzw. deren systematische Veränderung durch äußere Einflüsse von Bedeutung sind. Als Folge dieser allerdings keineswegs selbstverständlichen Feststellung verlagert sich das Hauptgewicht in Richtung auf die Erfassung physikalischer bzw. mechanischer Kennwerte. Dies gilt bei SO<sub>2</sub>-Angriff natürlich für den Fall, daß ein nennenswerter Kalkanteil vorhanden ist, der aus den Steinen selbst stammt oder auch von fremder Herkunft sein kann. Auch L. O b e r t et al. (151) beklagen beispielsweise den - immer noch vorhandenen - Mangel an genauen Kenntnissen über Zusammenhänge zwischen petrografischen und physikalischen Eigenschaften der in Bergwerken anstehenden Gesteine und haben entsprechende systematische Studien insbesondere über mechanische Parameter durchgeführt.

Demnach soll den physikalischen und physikalisch-technischen Verfahren ein besonderes Augenmerk gewidmet werden und die Beschreibung der sich auf die chemische Zusammensetzung bzw. dem Phasenaufbau beziehenden, hier unter dem Begriff

"petrografisch" zusammengefaßten Merkmale nur summarisch erfolgen. Während die derzeit üblichen Methoden lediglich in einer pauschalen Kurzbeschreibung abgehandelt werden, ist bei den für die Gefügecharakterisierung herangezogenen Verfahren neben den Grundlagen und dem Anwendungsbereich der Probenvorbereitung und der Funktionsweise sowie der Darstellung der Ergebnisse größere Aufmerksamkeit eingeräumt worden. Das gilt sowohl für die bekannten Verfahren, die meist auf spezielle Anforderungen zugeschnitten werden müssen, als auch für bisher nicht überall gebräuchliche Techniken, insbesondere aber für neuentwickelte, deren Resultate noch nicht allgemein Anerkennung gefunden haben. Sofern die behandelten Methoden Zahlenwerte liefern, werden - und zwar am Ende der jeweiligen Verfahrensbeschreibung - zur besseren Orientierung Grenzwerte angegeben, zwischen die sich die untersuchten Gesteine einordnen lassen. Auf diesem Wege soll das Verständnis für die später dargestellten Ergebnisse und deren Möglichkeiten zu umfassenderen Aussagen gefördert werden.

## 2.2 Chemische Zusammensetzung und Phasenaufbau

### 2.2.1 Mineralogische und chemische Analysen

Als Präparate für die petrografische Beurteilung der Gesteine unter dem Polarisationsmikroskop dienten jeweils zwei Dünnschliffe, und zwar je einer davon parallel und senkrecht zur erkennbaren Sedimentationsfläche. Neben der Identifizierung der Mineralphasen waren hier auch die Erfassung ihres Anteils und Umwandlungsgrads, Form und Geometrie der Gefügekörner sowie deren Anordnung von Interesse.

Für die mengenmäßige Bestimmung der einzelnen Komponenten erwies sich die Anwendung der Tafeln von M. S. S h v e t s o v (197) als nützlich. Eine Apparatur zur quantitativen Bildelementanalyse stand für die Kontrolle zur Verfügung. Trotz langwieriger präparativer Bemühungen gelang es jedoch nur in wenigen Fällen, eine zuverlässige "fotovisuelle" Phasentrennung im Sinne der gerätespezifischen Grauwertskala durchzuführen, weshalb vom weiteren Gebrauch dieser Einrichtung für den genannten Zweck abgesehen werden mußte. Die Größenverteilung der Gefügekörner (Quarz und Feldspat) ließ sich anhand ihrer Medianwerte nach dem Verfahren von G. M. F r i e d m a n (66) bestimmen. Grundlage hierfür stellt die Erfassung des größten Durchmessers von jeweils 300 Kornumrissen dar. Eine repräsentative Anzahl von Kornkontakten erhält man durch Auszählen von jeweils 100 Gefügekörnern. Deren Form wiederum ist durch Vergleich mit den Schemabildern von G. R i t t e n h o u s e (172) und die Rundung anhand der Skizzen von W. C. K r u m b e i n (118) ermittelt worden.

Als ein Maß für das petrografisch erkennbare Verwitterungsstadium des Feldspatanteils diene dessen Zersetzungsgrad - definiert mit Hilfe einer eigens auf das untersuchte Probematerial zugeschnittenen Skala von 0 bis 9. Hierbei bedeutet die Kennziffer 0, daß Feldspat ohne jegliches Anzeichen von Zersetzung, also vollkommen "ungetrübt" anzutreffen ist, wogegen bei 9 nur noch Zersetzungsprodukte - meist nach der Art von Pseudomorphosen - vorhanden sind (Kennziffer 5

charakterisiert demnach einen Zustand, bei dem etwas mehr als die Hälfte des ursprünglichen Feldspatvolumens umgewandelt worden ist).

Daneben wurden mit Hilfe eines Zählrohrgoniometers an texturarmen Pulverpräparaten aufgenommene Röntgenbeugungsdiagramme zur halbquantitativen Kontrolle und Ergänzung der mikroskopisch bestimmten Phasenzusammensetzung herangezogen. Zur Identifikation vor allem von Verwitterungsprodukten dienten u. a. aber auch thermogravimetrische Untersuchungen sowie die energiedispersive Röntgenmikroanalyse (vgl. Abschnitt 2.2.2), und zwar besonders deshalb, weil die Bestimmung der häufig in feiner Verteilung vorliegenden Nebenbestandteile wie auch hochdisperser Verwitterungsneubildungen auf polarisationsoptischem Wege manchmal recht problematisch war. Quantitativ konnte jedoch das Calcit/Dolomit-Verhältnis durch Differenzbildung mit dem im Polarisationsmikroskop ermittelten Gesamtcarbonat errechnet werden.

Durch coulometrische Titration (Methode nach OELSEN-ABRESCH) lassen sich Gesamtkohlenstoff als  $\text{CO}_2$  und Gesamtschwefel als  $\text{SO}_3$  bestimmen. Das Verfahren für  $\text{CO}_2$  beruht darauf, daß die auf  $<0,125$  mm zerkleinerte Probe im getrockneten  $\text{CO}_2$ - und  $\text{SO}_2$ -freien Luftstrom bei  $1000^\circ\text{C}$  zersetzt wird, wodurch sich vorhandener Kohlenstoff in Kohlendioxid umwandelt und auch der Carbonat-Kohlenstoff als  $\text{CO}_2$  entweicht. Die Absorption des  $\text{CO}_2$  erniedrigt den pH-Wert einer alkalischen Bariumperchlorat-Lösung bei gleichzeitiger Entstehung von Bariumcarbonat. Die dabei verbrauchte Menge an Hydroxylionen wird durch Elektrolyse solange neu gebildet, bis sich der pH-Ausgangswert eingestellt hat, wobei die hierfür verbrauchte Strommenge dem absorbierten  $\text{CO}_2$ -Anteil äquivalent ist. Diese Bestimmung ist für carbonat- bzw. kohlenstoffhaltige Gesteine (89) sowie Kalkprodukte (152) mit Erfolg herangezogen worden. Bei der Ermittlung des  $\text{SO}_3$ -Anteils ist die Prozedur ähnlich, jedoch wird das bei  $1350^\circ\text{C}$  freigesetzte Schwefeldioxid in einem Gefäß absorbiert, in dem sich eine mit Wasserstoffperoxid versetzte saure Natriumsulfatlösung befindet (vgl. Bedienungsanleitung für den Coulomaten 7000 der Firma STRÖHLEIN & Co., Düsseldorf). Den Sulfitanteil erhält man durch Freisetzen von  $\text{SO}_2$  mit Hilfe verdünnter Phosphorsäure. Durch Subtraktion des Sulfits vom Gesamtschwefel ergibt sich die Summe Sulfat + Sulfid.

## 2.2.2 Röntgenanalyse im Rasterelektronenmikroskop

### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Die zur Untersuchung natürlicher Ober- und Bruchflächen im Rasterelektronenmikroskop herangezogenen Präparate müssen in der Regel erst mit einem elektrisch leitenden Überzug - im vorliegenden Falle zweckmäßigerweise Kohlenstoff - versehen werden. Sichtbar gemacht wird die Morphologie durch Sekundärelektronen, die ein die Oberfläche der als "Antikathode" geschalteten Probe rasterartig überstreichender Elektronenstrahl auslöst. Jene erzeugen nach Durchlaufen einer Detektoranordnung auf dem nachleuchtenden Schirm eines Oszillografen das topografische Sekundärelektronenbild. Eine Vergrößerung der Anwendungsbreite des Geräts ist dadurch gegeben, daß die gleichzeitig erzeugten charakteristischen Röntgenquanten der Elemente mit einer Ordnungszahl von 9 an aufwärts mit Hilfe

der energiedispersiven Technik erfaßt werden können. Durch ein solches Mikroverfahren ist aber - im Gegensatz zu den meisten anderen analytischen Methoden - keine integrale Gesamtanalyse über einen größeren Oberflächenbereich des Materials möglich; man erhält vielmehr Aussagen über die jeweilige lokale Elementverteilung.

### Anwendungsbereich

Wellenlängendispersive Spektrometer, wie sie beim Elektronenstrahl-Mikroanalysator (sog. Mikrosonde) eingesetzt werden, erfordern bei der Registrierung von jeweils nur einer Wellenlänge komplizierte und präzise Veränderungen der Spektrometereinstellung und wegen der Fokussierungsbedingungen polierte oder doch wenigstens weitgehend ebene Präparate. Demgegenüber lassen sich mit der energiedispersiven Röntgen-Mikroanalyse (EDX) auch raue Oberflächen verschiedener Neigung untersuchen. Ein weiterer Vorteil des bisher nur in begrenztem Umfang für quantitative Aussagen geeigneten Verfahrens besteht darin, daß man die Spektrallinien der erfaßten Elemente - unter Wegfall aller Linien höherer Ordnung - gleichzeitig auf einem Bildschirm darstellen und das Auflaufen des Spektrums während der Analyse verfolgen kann. Diese Methode gestattet es, schnelle qualitative und halbquantitative Bestimmungen lokaler Bereiche auch an unebenen Flächen und bei niedriger Nachweisgrenze der Elemente durchzuführen (Näheres zum Verfahren und weitere Literatur vgl. z. B. H. H a n t s c h e (81)). Im vorliegenden Falle sind neben den Elementen Si, Al, Ca und Mg, die die chemische Grundzusammensetzung der Sand- und Kalksteine kennzeichnen, Fe und Na, vor allem aber S von Interesse. K und Ti haben dagegen für die Charakterisierung der Reaktionen sowie der innerhalb des Porenraums ablaufenden Transportvorgänge meist nur geringe Bedeutung.

### Untersuchungsverfahren

#### Probenvorbereitung

Grundsätzlich kann man Präparate mit einem Durchmesser bis zu 30 mm und einer Höhe bis zu 15 mm in dem für die Untersuchung zur Verfügung stehenden Rasterelektronenmikroskop Cambridge Stereoscan Mark II A benutzen. Die Probe soll so beschaffen bzw. vorbehandelt sein, daß sie keine übermäßigen Mengen an flüchtigen Bestandteilen enthält, die unter dem Vakuum im Innern des Geräts entgasen und dieses bzw. die Elektronenoptik verschmutzen. So ist bei der Analyse zu berücksichtigen, daß viele kristallwasserhaltige Verbindungen, wie etwa die leichtlöslichen Sulfate, unter den Bedingungen des Probenraums in wasserärmere bzw. wasserfreie Varietäten übergehen. Vorgänge dieser Art finden auch dann statt, wenn das Material durch Bedampfung oder Ionenbesprühung (sputtering) mit einem elektrisch leitfähigen Überzug versehen wird.

#### Funktionsweise

Um die einzelnen Spektrallinien der auf der Probenoberfläche erzeugten Röntgenstrahlung voneinander zu trennen und so den verschiedenen Elementen bzw. Energieniveaus zuzuordnen, wird hier ein energiedispersives Spektrometer verwendet. Die erzeugten Röntgenquanten fallen ohne Sortierung unmittelbar auf einen mit



flüssigem Stickstoff gekühlten, lithiumdotierten Silicium-Halbleiterdetektor. Da die Energie dieser Quanten der Anzahl der Ionisierungen im Siliciumkristall proportional ist, können die entsprechenden Spannungsimpulse über den ganzen Energiebereich klassifiziert und das gesamte Spektrum auf einem Bildschirm sichtbar gemacht werden. Die Registrierung erfolgt auf fotografischem Wege oder mit Hilfe eines xy-Schreibers. Das energiedispersive Verfahren gestattet - wie auch die wellenlängendispersive MikroanalySATORTECHNIK - Punktanalyse, Abrasterung längs einer Linie (Line scan) und die Abrasterung einer Fläche (Elementverteilungsbild).

### Darstellung der Ergebnisse

Neben der üblichen Fotodokumentation von Punktanalyse und Elementverteilung bietet sich die Bestimmung längs einer Linie und eines aus mehreren solchen Analysen zusammengesetzten Tiefenprofils an. Das ist beispielsweise für Sulfatanreicherungen in kalkhaltigen Baustoffen und ihre Erfassung auf Bruchflächen senkrecht zur Materialbegrenzung von Interesse. Um eine mittlere Elementkonzentration für Schichten zu erhalten, die von der Baustoffoberfläche unterschiedlich weit entfernt sind, trägt man die mit Hilfe der Linienabrasterung gewonnenen Spektren von gleicher integraler Impulszahl nach der relativen Röntgenintensität ihrer Elementanteile über der Ortskoordinate auf, wodurch Kurven bzw. Elementverteilungsbilder erhalten werden, die einfach und übersichtlich sind (vgl. Abschnitt 3.3.3). Zur Beurteilung von Material, das den atmosphärischen Luftverunreinigungen ausgesetzt worden ist, bzw. dessen Veränderungen kann - wie von H. V o l k m a n n (203) u. a. an Profilstahlproben gezeigt - das Rasterelektromikroskop auch schon ohne Röntgenanalysezusatz wertvolle Informationen liefern.

## 2.3 Porenraumbezogene Eigenschaften und Merkmale

Der Porenraum, insbesondere sein offener Anteil, stellt ein wesentliches Gefügemerkmal der mineralischen Baustoffe dar. Er ist maßgebend für deren Verwitterungsverhalten, da über ihn der Transport von Feuchtigkeit auch in Form von Wasserdampf oder Lösungen vonstatten geht. Von den zahlreichen Porositätskennwerten können nur einige in den folgenden Abschnitten berücksichtigt werden.

### 2.3.1 Porosität und Wasseraufnahme

#### Grundlage und Ziel der Verfahren

In diesem Zusammenhang spielen die Rohdichte nach dem Auftriebsverfahren (DIN 52 102 (48)) und die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck sowie unter einem Druck von 150 bar nach Entlüften der Proben unter Wasser (DIN 52 103 (49)) eine wichtige Rolle. Der Quotient aus den letzten beiden Werten entspricht dem Sättigungswert S (kurz S-Wert genannt; vgl. DIN 52 113 (57)), der "zum Beurteilen der Widerstandsfähigkeit gegenüber Frostbeanspruchung (Eisbildung) herangezogen" wird. Da die entsprechenden Methoden in den erwähnten Normen mehr oder weniger ausführlich beschrieben sind, kann auf die nähere Darstellung von Einzelheiten teilweise verzichtet werden.

### Anwendungsbereich

Abgesehen davon, daß sich die zu untersuchenden Baustoffe unter Wassereinwirkung nicht merklich verändern dürfen, unterliegt die Auswahl des Probematerials praktisch keiner Beschränkung. Jedoch lassen sich bei der Wasseraufnahme nur dann brauchbare Werte erwarten, wenn ein nennenswerter offener Porenraum vorhanden ist. Über den bereits von H i r s c h w a l d im Jahre 1908 vorgeschlagenen "Sättigungskoeffizienten" ((91) S.154-157) und seine Eignung für die Beurteilung des Frostwiderstands bestehen in der Literatur unterschiedliche Auffassungen. Das gilt in besonderem Maße für die Annahme des S-Werts als Schwelle zwischen frostempfindlichen und- unempfindlichen Materialien. Die theoretisch begründete Grenzziehung bei 0,9 soll ja schließlich der Möglichkeit Rechnung tragen, daß gefrierendes Wasser während seiner Volumenvergrößerung um 9 % noch genügend Platz zum Ausweichen innerhalb der Poren vorfindet. Im Intervall zwischen 0,8 und 0,9 sind Baustoffe erfahrungsgemäß immer noch als frostgefährdet anzusehen. So stellt A. D i e t z e l (42) fest, daß Dachziegel bei einem Verhältnis "von 0,85 oder 0,9 jahrelang halten", während andere bereits "mit einem S-Wert von 0,8 zerfriren" können, was er mit der - in vielen Fällen bauphysikalisch beeinflussten - Zeitdauer in Zusammenhang bringt, in deren Verlauf sich der Scherben etwa infolge einer langsamen Schneeschmelze mit Wasser vollsaugt. H. B r e y e r (28) postuliert, "streng genommen liegt die Grenze bei  $S = 0,910$ ", und sieht bei  $S = 0,850$  "lediglich eine Sicherheitsgrenze, denn niemand wird Bausteine mit einem relativ hohen S-Wert größer als 0,850 verwenden, wenn er solche mit kleineren S-Werten und daher mit günstigeren Frostbeständigkeitsgraden erhalten kann". Selbst wenn man die Bedeutung dieser Verhältniszahl, die übrigens auch von G. C. R o b i n s o n et al. (174) als einziges zuverlässiges Kennzeichen zur Unterscheidung angesehen wird, nicht in Frage stellen will, ist sie aber keineswegs ein unfehlbares Kriterium, wie etwa vom vorgenannten Autor (24), (25), (26) behauptet wird (hier ebenfalls für den Frostwiderstand von Ziegelmaterial). Denn die aufgenommene Wassermenge sagt zwar etwas über die "vorhandenen Hohlräume, nichts aber über die Form dieser Hohlräume und über deren Orientierung gegenüber der Oberfläche" aus (A. S t o i s (193)). Daß der S-Wert nicht als absolutes Maß für das Verhalten bei Frosteinwirkung gelten kann und beispielsweise im Verhältnis zur offenen Porosität und der mechanischen Festigkeit gesehen werden muß, ist seit langem gesichertes Erkenntnis (vgl. (10)), auch wenn er "ein gewisses Bild über den Frostwiderstand" (101) vermittelt. So nimmt es auch nicht wunder, wenn von L. A. P a l m e r und J. V. H a l l (156) behauptet worden ist, daß keine feste Beziehung zwischen der dem S-Wert nahestehenden "Schurecht ratio" und dem Frostwiderstand (174) besteht. Das veranlaßt übrigens die Autoren zu der Folgerung, daß es hierfür "wahrscheinlich andere Faktoren gibt, über deren Existenz man sich noch nicht im klaren ist".

Erwähnen sollte man aber ebenfalls, daß von D. B. H o n e y b o r n e und P. B. H a r r i s (99) - gestützt auf zahlreiche experimentelle Daten - der Sättigungswert nur als ein "rohes Maß für die Porenstruktur" bezeichnet worden ist. Über die Unzulänglichkeit des S-Werts liegen noch andere "Klagen" vor. So wird dessen Nutzen von C. E n b e r g (63) bestritten, weil er nicht imstande sei, frostunempfindliche Ziegel und ihre "frischen" Äquivalente voneinander unterscheidbar zu machen - eine Argumentation, die vermutlich in einer irrtümlichen und daher ungerechtfertigten Erwartungshaltung begründet liegt, weil hier

offenbar Ursache und Wirkung verwechselt werden. Denn die Aufgabe dieses Koeffizienten besteht ja darin, das voraussichtliche Frostverhalten anhand von porenraumbezogenen Verhältnissen einzuschätzen. Erwähnenswert scheint weiterhin die stillschweigende Voraussetzung, daß der mit eingeschlossener Luft gefüllte Porenraum bei der Eisbildung als Ausweichmöglichkeit stets ohne Einschränkung verfügbar sein soll, obwohl doch Luft nicht beliebig zu komprimieren ist, so daß diese unter bestimmten Bedingungen in gleichem Sinne zerstörend wie der Eisdruck wirken kann. Auch wird bei der Ermittlung des S-Werts "aber nur, wenn auch auf eine besondere, den Vorgängen in der Natur angenäherte Weise, die Porosität bestimmt, die Elastizität dagegen außer acht gelassen" (H. L e h m a n n (124)).

Anhaltspunkte dafür, daß man dem in einem Baustoff vorhandenen Porenraum durch Annahme einer einfachen Geometrie - wie etwa für die Bestimmung des behandelten Parameters erforderlich - in praxi wohl kaum gerecht werden kann, liefern u. a. bereits Modellversuche von K. B e r g m a n n (16). Dieser Autor hat sich nämlich bei Nachahmung der Verhältnisse in keramischen Produkten ausführlich mit zusammengesetzten Hohlraumssystemen und deren Füllungszustand unter verschiedenen Bedingungen der Wasserzufuhr, des Einflusses von Luft sowie der Anordnung der Poren gegenüber der Erdoberfläche befaßt. Auch soll nach Erfahrungen von A. D i e t z e l (42) ein breites Porenspektrum einen niedrigen, dagegen eine Anhäufung von gleichmäßig großen Poren einen hohen S-Wert von Dachziegeln zur Folge haben. Eine weitere Schmälerung von dessen Bedeutung ist aus nahezu der gleichen Richtung zu erwarten, wenn etwa ein sonst dichter Kalkstein zusätzlich ein Porenmaximum aufweist, das Dimensionen erreicht, bei denen das Wasser aus den Poren einfach von selbst herausfließt. Unter solchen Bedingungen wird ein niedriger Wert erhalten, der physikalisch jedoch kaum noch einen Sinn hat; denn der "eigene S-Wert" etwa eines zweiten, im Mikroporenbereich gelegenen Maximums würde auf solche Weise glatt überdeckt werden können. Im ungünstigen Fall wäre dann demnach auch eine Zerstörung trotz des scheinbar niedrigen Sättigungswerts denkbar. Gleichfalls im Hinblick auf den Frostwiderstand dürften hier die nach Ansicht von K. K e i l (110) häufig übersehenen "unterschiedlichen Grenzflächenreaktionen zwischen Wasser an den Benetzungsstellen" mit den Mineralkörnern bestimmend sein. Als eine Beeinträchtigung der Brauchbarkeit des zur Charakterisierung gern verwendeten Sättigungswerts sieht beispielsweise S. G r u n e r t (72) die Tatsache an, daß Schichtsilikate aus dem Zwischenmittel von Sandsteinen Wasser lokal stark binden und so die Sprengwirkung des Eises dennoch zur Wirkung kommt. Weitere Faktoren bzw. Fehlerquellen, die bei der Ermittlung des S-Werts von Sedimentgesteinen eine Rolle spielen können, werden beispielsweise von K.-H. S c h u l z e (184) und V. R e i n h a r d t (167) diskutiert. P. P. B u d n i k o v und G. S. B l o c h (31) machen summarisch für die gelegentliche Unsicherheit einer Aussage über das Frostverhalten anhand des S-Werts vor allem folgende Faktoren verantwortlich: die Methodik der Bestimmung, das zusätzliche Wasseraufsaugen während der Frosttauwechselprozesse, die Feuchtigkeitwanderung beim Befrosten, das Auspressen von Teilen der gefrorenen Feuchtigkeit an die Materialoberfläche, die Unvollständigkeit der Eisbildung beim Befrosten sowie physikalisch-chemische Phänomene.

Auf örtlich verschiedene S-Werte innerhalb von Baustoffen weisen schließlich die von den genannten Autoren an Mauerziegeln gewonnenen Ergebnisse hin. Obwohl sich



die entsprechenden Erkenntnisse vom keramischen Scherben ausgehend sicher nicht ohne weiteres z. B. auf die durch ein Haufwerk von Gefügekörnern geprägten Sandsteine übertragen lassen, so dürften doch grundsätzliche Ähnlichkeiten erwartet werden, zumal es sich auch - im Gegensatz etwa zu Beton und Mörtel - in beiden Fällen um weitgehend "inertes" Material handelt. Bei derart komplizierten Zusammenhängen ist schließlich auch zu bezweifeln, ob der von B r e y e r propagierten "alleinseligmachenden" Stellung des S-Werts einfach mit kategorischer Ablehnung beizukommen ist, indem man dessen Bedeutung für die Beurteilung ausgerechnet unter Berufung auf die Dachziegel bestreitet, die hinsichtlich Herstellung, Geometrie und Position am Bauwerk sicherlich nicht gerade repräsentativ für andere Materialien sind (212). Zementgebundene Baustoffe unterliegen anscheinend eigenen Gesetzen, die eine Anwendbarkeit des S-Werts noch fraglicher werden lassen (109), (207), (209). Verantwortlich dafür ist das Gefüge des Zementsteins. Hier kommt besonders zur Geltung, daß das Porenvolumen unabhängig von der Porengrößenverteilung in die Rechnung eingeht, d. h. im Zähler des Quotienten wird "nicht zwischen gefrierbarem und nicht gefrierbarem Wasser unterschieden" (177).

Die meisten Einwände gegen den S-Wert und vergleichbare Kriterien als Maß für den Frostwiderstand lassen sich letztlich auf einen grundsätzlichen Mangel zurückführen: Hier handelt es sich um einen theoretisch begründeten Parameter, der von idealisierten Verhältnissen ausgeht, die häufig weder vom Baustoff noch von den Versuchsbedingungen her gegeben sind. Daran ändert auch die Tatsache nichts, daß die Methode leidlich reproduzierbare Zahlenwerte liefert. Von Befürwortern wie Gegnern wird im übrigen meist nicht beachtet, daß H i r s c h w a l d selbst diesem Wert keinesfalls die Allgemeingültigkeit beigemessen hat, die ihm später vielfach zugeschrieben worden ist. So weist der Autor z. B. ausdrücklich daraufhin, daß auch "Gesteine mit dem Sättigungskoeffizienten 0,7 bis 0,8 frostunbeständig sein können, wenn sie eine vollkommene Schichtung bzw. Schieferung besitzen oder aber infolge besonderer Strukturverhältnisse eine sehr ungleiche Wasserfüllung der Hohlräume aufweisen, ..." ((91), S.44). Durch Einführung eines Verteilungs- sowie eines Erweichungskoeffizienten hat er versucht, derartigen "Störfaktoren" Rechnung zu tragen, was bei voll befriedigenden Ergebnissen nicht notwendig gewesen wäre. Die Diskussion wird zusätzlich dadurch erschwert, daß eine Reihe von Verfahren existiert, die auf den gleichen Überlegungen basieren, aber - ohne daß dies immer erkannt wird - durch Varianten in der Methodik und damit auch in ihren Resultaten voneinander abweichen können. Auch unter der Bezeichnung Sättigungskoeffizient können sich unterschiedliche Prüfbedingungen verbergen. So sieht z. B. die entsprechende RILEM-Empfehlung (170) im Gegensatz zur Methode nach DIN 52 113 einen Quotienten aus der Wasseraufnahme nach 48-stündiger Lagerung bei Atmosphärendruck und der unter Vakuum vor (57), ASTM C 67-80a (11) dagegen die Relation zwischen den absorbierten Mengen nach 24-stündiger Lagerung in kaltem Wasser und nach 5-stündiger in kochendem Wasser (Schurecht ratio). Von G. C. R o b i n s o n et al. (174) wird bei Mauerziegeln unter Bezugnahme auf ASTM C 62 (vgl. (10)) ein Mittelwert von 0,74 bzw. 0,78 für die sichere Obergrenze gehalten. Ein dem S-Wert ähnlicher Quotient ist auch in der belgischen Norm NBN B 05-201 (vgl. Abschnitt 2.3.2) zur Anwendung vorgeschlagen worden. Von diesem wird übrigens auch behauptet, er ließe sich weit universeller im Sinne eines Indikators für die Beständigkeit von Kalksteinen einsetzen (123).

Ungeachtet dieser Anmerkungen spielt der Grad der Wassersättigung eine entscheidende Rolle für das Verhalten beim Frostangriff. Auf die Resultate anknüpfender Arbeiten, wie z. B. der von G. F a g e r l u n d über den kritischen Sättigungsgrad (64) kann hier nicht eingegangen werden. Andererseits scheint aber der S-Wert ein brauchbares Merkmal darzustellen, das in Verbindung mit anderen zur Charakterisierung von Baustoffen sehr wohl beiträgt (vgl. auch (99)).

### Prüfverfahren

#### Probenvorbereitung

Für die Bestimmung der Rohdichte wird ein Mindestvolumen der Probe von  $50 \text{ cm}^3$  gefordert. Zur Ermittlung der Wasseraufnahme dienen "150 bis 350 g schwere Stücke, in der Regel von gedrungener Form". "Die Proben sind unter Wasser zu reinigen und von losen Teilen zu befreien". Obwohl für die Bestimmung der Rohdichte nur "jeweils mindestens drei möglichst gleichartige Proben zu prüfen" sind, ist der Versuch gemäß der Forderung für die Wasseraufnahme (49) meist an fünf Proben durchgeführt worden.

#### Funktionsweise

Erforderlich sind ein Wärmeschrank für Temperaturen bis mindestens  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , eine Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,05 \text{ g}$ , deren Aufhängung die Wägung unter Wasser gestattet, ein Exsikkator sowie Gefäße für die Lagerung in destilliertem Wasser. Um geeignete Versuchsbedingungen zur Ermittlung des S-Werts zu schaffen, benötigt man darüber hinaus eine Vakuumpumpe für 30 mbar Restdruck sowie einen Drucktopf, der bis 150 bar ausgelegt ist.

Zur Bestimmung der Rohdichte werden die bei geeigneter Temperatur bis zur Massekonstanz getrockneten Proben eine Stunde lang etwa zur Hälfte ihrer Höhe in luftfrei gekochtes destilliertes Wasser einer Temperatur von  $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$  eingetaucht, anschließend vollständig mit  $(20 \pm 5) \text{ mm}$  Wasser überdeckt, nach insgesamt 24 Stunden dem Lagerungsgefäß entnommen, mit einem feuchten ausgedrückten Schwamm abgetupft und gewogen. Diese Zeit reicht in der Regel aus, um merkliche Veränderungen des Wassergehalts während der Wägung auszuschließen. Zur Ermittlung des Volumens dient eine hydrostatische Waage. Der Tränkungs Vorgang bei der Wasseraufnahme unterscheidet sich hiervon lediglich dadurch, daß er bis zur "Massekonstanz" betrieben wird. Ist diese erreicht, werden die Proben im Drucktopf bei etwa 50 mm Überdeckung und einem Restdruck "von etwa 30 mbar solange entlüftet, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen (meist genügen 3 Stunden) und anschließend weitere 2 Stunden unter Wasser bei Atmosphärendruck belassen". Schließlich wird ein Druck von 150 bar aufgebracht, 24 Stunden lang aufrechterhalten und nach der Entnahme aus dem Drucktopf erneut die Masse der Probe ermittelt.

Da man annehmen kann, daß besonders bei hohem Anteil an kleinen Poren die Benetzbarkeit durch das flüssige Medium für die Ermittlung des S-Werts eine Rolle spielt, ist an ausgewählten Proben hierzu parallel eine Bestimmung des Porenvolumens unter Auffüllung des offenen Porenraums mit Tetrachlorkohlenstoff versucht worden. Den als  $\text{CCl}_4$ -Füllungsgrad bezeichneten Wert erhält man als Quotienten mit Hilfe der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Wasserkapazität durch

das auf diese Weise erfaßte Porenvolumen. Die Prozedur für diese Versuchsvariante ist folgende: Die Probekörper werden bis zur Massekonstanz getrocknet und nach 24 h dauernder Evakuierung mittels einer Wasserstrahlpumpe schließlich mit Tetrachlorkohlenstoff übergossen, nach kurzzeitiger erneuter Evakuierung im geschlossenen Exsikkator 48 h lang sich selbst überlassen und die Gesamtmasse durch Wägung ermittelt. Das für die Rechnung gleichfalls erforderliche Volumen ergibt sich aus der nachfolgenden Wägung der untergetauchten Probe. Das derart errechnete Porenvolumen, das dem Nenner des  $\text{CCl}_4$ -Füllungsgrads entspricht, ist indes meist nicht aussagekräftiger als das im Falle des S-Werts bei einem Druck von 150 bar mit Wasser erhaltene. So kann ein anomales Verhalten, das sich gelegentlich auch von dem des Wassers unterscheidet, dadurch hervorgerufen werden, daß etwa tonige oder andere feindisperse Einlagerungen zwischen den Gefügekörnern (z. B. Eisenoxidhydrate) durch das verwendete organische Lösungsmittel zum Aufquellen gebracht werden, auf diesem Wege wahrscheinlich Porenzugänge verstopfen und damit eine vollständige Auffüllung des offenen Porenraums behindern. Eine merkliche Beeinflussung durch das genannte Phänomen ist allerdings, wenn überhaupt nach bisherigen Erfahrungen nur bei Gehalten an Ton oder anderen Schichtsilikaten von etwa 5 % und mehr zu erwarten. Bei der Gegenüberstellung von S-Wert und dem erwähnten  $\text{CCl}_4$ -Füllungsgrad zeigt sich eine nahezu lineare Abhängigkeit. Einige Gesteine mit erhöhtem Tongehalt brauchen diesen Verlauf nicht zwangsläufig zu beeinträchtigen, was vielleicht damit zusammenhängt, daß sich die Schichtsilikate gegenüber Wasser und Tetrachlorkohlenstoff dann gleichsinnig verhalten und daher keine Abweichungen sichtbar werden lassen. Ganz allgemein läßt sich jedoch feststellen, daß die Nachteile bei der Verwendung von  $\text{CCl}_4$  nur in einigen Fällen durch die scheinbaren, aber nur unzureichend kontrollierbaren Vorzüge des Verfahrens hinsichtlich der Füllung des Porenraums auszugleichen sind.

#### Darstellung der Ergebnisse

Die Genauigkeit, mit der sich die Wasseraufnahme und damit der S-Wert ermitteln lassen, ist erwartungsgemäß dann gering, wenn das Probematerial eine niedrige offene Porosität (<1 % Wasseraufnahme als Masseanteil) besitzt. Auch J. H. G r i f f i t h ((71), S.39) hat im Zusammenhang mit der Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Porosität bereits festgestellt, daß eine etwa im Bereich < 4% Flüssigkeitsaufnahme auftretende Meßwertstreuung in erster Linie darauf zurückzuführen ist, daß "keine allzu genauen Verfahren" für die Erfassung geringer offener Porenvolumina zur Verfügung stehen. Unter der offenen Porosität  $\epsilon_0$  hat man im Falle der vorliegenden Arbeit den auf das Volumen bezogenen Anteil des Porenraums zu verstehen, der bei einer Beaufschlagung mit 150 bar durch Wasser aufgefüllt wird.

Grafische Darstellungen des S-Werts in Beziehung zu anderen Merkmalen zeigen auf der entsprechenden Koordinatenachse in der Regel einen Fußpunkt bei etwa 0,6. Als plausible Erklärung hierfür bietet sich vielleicht eine Beobachtung von L. A. P o g g i (158) an, der an derselben Stelle ein plötzliches Abknicken des Verlaufs der Grenzlinie zwischen frostbeständigen und nicht frostbeständigen Ziegeln anhand einer erweiterten Beziehung zwischen Wasseraufnahme und S-Wert nachgewiesen hat. Möglicherweise liegt hier einer der Schlüssel zur Lösung des Problems.

Das Probematerial zeigt für die Rohdichte Werte zwischen 1920 und 2660 kg/m<sup>3</sup>, eine Wasseraufnahme zwischen etwa 2,5 und 25 Vol.-% sowie S-Werte zwischen 0,55 und 0,99.

### 2.3.2 Kapillare Wasseraufnahme

#### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Die kapillare Wasseraufnahme durch einen porösen Baustoff ist auf innere Kräfte zurückzuführen, die sich infolge der Oberflächenspannung der in den Öffnungen des Materials haftenden Flüssigkeit einstellen. Die Größe einer solchen Kraft hängt im wesentlichen vom Durchmesser der Poren und dem Material der Kapillare wandungen ab. Wie sich die komplexen Prozesse der Be- und Entfeuchtung von diesen beiden Merkmalen beeinflussen lassen, hat u.a. E. S o m m e r (192) im Detail gezeigt. Die Vorgänge bei derartigen Wasserbewegungen, die erfahrungsgemäß im Porenraum mit Öffnungen < 0,5 mm stattfinden (120), werden üblicherweise durch gravimetrische Bestimmung der Feuchtigkeitsaufnahme in zeitlichen Abständen nach Eintauchen des Probekörpers mit seiner Unterfläche in Wasser charakterisiert. Im einfachsten Falle wird dieser hierbei kurzzeitig aus dem Wasser genommen, abgetupft und seine Masse durch Wägung ermittelt. Abgesehen vom verhältnismäßig hohen Arbeitsaufwand liegt der Nachteil der Methode vor allem in versuchsbedingten Ungenauigkeiten, die z. B. auch mit der Unterbrechung des Saugvorgangs im Zusammenhang stehen (weitere einfache Prozeduren zur kontinuierlichen Erfassung der kapillaren Wasseraufnahme vgl. (9)).

#### Anwendungsbereich

Das Verfahren eignet sich vorzugsweise für die Untersuchung von Probematerial, das innerhalb eines Zeitraums von etwa einer Woche erkennbar durchfeuchtet wird. Bei längerer Versuchsdauer ist eine Konstanz des Raumklimas von zunehmender Bedeutung. Gegebenenfalls muß damit gerechnet werden, daß eine Verfälschung der Ergebnisse durch Masseänderung z. B. infolge von Algen- oder Pilzwachstum eintritt. Voraussetzung für den Einsatz der hier angewendeten Methode ist allerdings, daß die Wasseraufnahme nicht durch Auslaugungs- oder Quellvorgänge beeinflusst wird. So treten Schwierigkeiten dann auf, wenn die Proben merkliche Mengen an löslichen Salzen enthalten. Desgleichen können sich Probleme ergeben, wenn das Material Inhomogenitäten aufweist oder aber mit Hydrophobierungs- bzw. Konservierungsmitteln vorbehandelt worden ist.

#### Prüfverfahren

##### Probenvorbereitung

Für die Prüfung werden Probekörper 5 cm x 5 cm x ca. 15 cm herangezogen. Das hat sich als zweckmäßig erwiesen, da man diese nach Versuchsende zu Würfeln von 5 cm Kantenlänge weiterverarbeiten kann, die anderweitig zu gebrauchen sind (vgl. z. B. Abschnitt 2.4.1 und 2.5.2). Die in bezug auf die Prismenflächen etwa planparallelen Probekörper werden vor dem Versuch bis zur Massekonstanz getrocknet.

Es sind jeweils zwei solcher Prismen verwendet und die kapillare Feuchtigkeitswanderung sowohl senkrecht als auch waagrecht zu den erkennbaren Sedimentationsflächen untersucht worden.

#### Funktionsweise

Zur kontinuierlichen Ermittlung des zeitabhängigen kapillaren Feuchtigkeits- transports dient ein verhältnismäßig großflächiger, abgedeckter Wasserbehälter ( $0,32 \text{ m}^2$  Oberfläche), in den der Probekörper an einem elektrischen Kraftmeßbügel hängend eingetaucht wird (Abb. 1). Dafür weist das Gefäß eine rechteckige Aussparung in der Abdeckung auf, die etwa 10 % seiner Gesamtfläche ausmacht. Bei dem hier untersuchten Material wirkt sich daher die Verdunstung des Wassers nur unwesentlich auf den Pegelstand aus. Es empfiehlt sich, einen schräg am Rand der Aussparung gelehnten kleinen Spiegel zu benutzen, um bei Versuchsbeginn das Absenken des Prismas zu kontrollieren und ggf. eine Anhäufung von Luftblasen auf seiner Unterseite festzustellen, die die Ergebnisse verfälschen können. Eine Greifvorrichtung verbindet den Probekörper, dessen ebene Oberfläche mit Hilfe einer Libelle horizontal ausgerichtet ist, mit dem für die Erfassung einer Masse von maximal 5 kg ausgelegten Meßbügel.

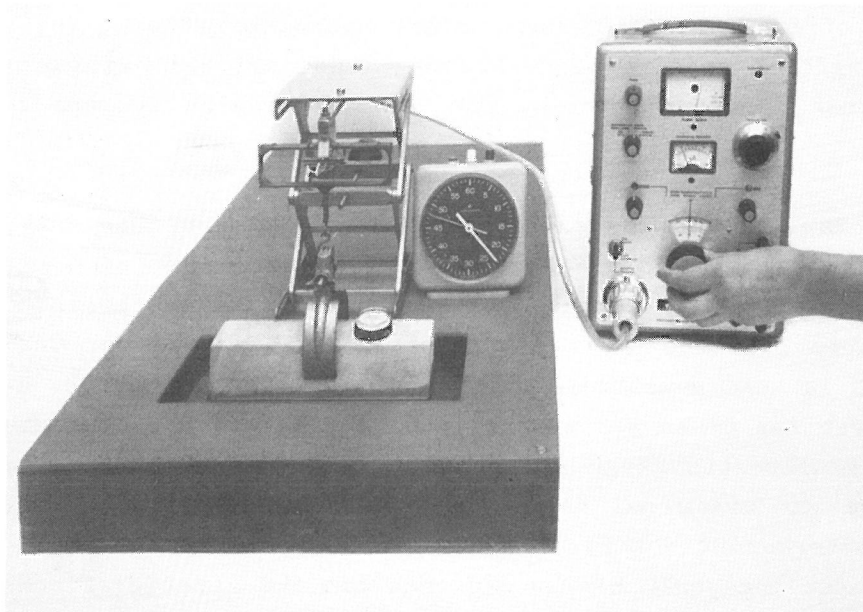


Abb. 1  
Kraftmeßeinrichtung zur kontinuierlichen Wägung der kapillaren Wasseraufnahme

Diese in der Bundesanstalt entworfene Vorrichtung ist mit Dehnungsmeßstreifen in Vollbrückenschaltung für eine Zugkraft bis 50 N ausgelegt und hat eine Empfindlichkeit von  $2 \text{ mV/V}$ . Darüber hinaus werden für den Versuch ein elektrischer Kompensator hoher Genauigkeit (Meßbereich  $100\,000 \text{ Skt.} \hat{=} 5 \text{ mV/V}$ ) sowie eine Stoppuhr benötigt. Der Kraftmeßbügel ist seinerseits an einer kleinen Laborhebebühne mit Scherengelenken befestigt, die den Versuchsaufbau höhenverstellbar macht.

Für Langzeitmessungen wird daneben eine diskontinuierliche Versuchsvariante - also mit periodischer Wägung - betrieben, die mit einem Konstanthalter für das Wasserniveau versehen ist. Ein solcher Aufbau braucht jedoch im Fall des untersuchten Materials und der gegebenen Probekörperhöhe nur gelegentlich angewen-



det zu werden. Bei beiden Varianten wird das Raumklima konstant gehalten. Als Prüfflüssigkeit dient destilliertes Wasser.

Das sorgfältig von bröckeligen Partien an seinen Kanten befreite Prisma wird mit Hilfe der Laborhebebühne so lange abgesenkt, bis es mit seiner Unterseite etwa 2 mm unter die Wasseroberfläche eintaucht. Unmittelbar darauf erfolgen die Messungen in möglichst regelmäßigen Abständen (für den  $\sqrt{t}$ -Maßstab) durch Nullabgleich des Kompensators. Der Zeitpunkt, zu dem die Feuchtigkeitsfront an die Gesteinsoberseite gelangt, wird beim vorliegenden Material spätestens nach etwa 6 bis 7 Tagen erreicht, wobei im äußersten Fall eine Meßdauer von 14 Tagen genügt.

### Darstellung der Ergebnisse

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Ergebnisse als Masseaufnahme in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Versuchsdauer darzustellen. Die entsprechende Kurve zeigt im allgemeinen zunächst einen steilen Anstieg, der dann in einen flacheren Verlauf übergeht. Der Schnittpunkt der für die beiden nahezu linearen Kurvenabschnitte gezeichneten Ausgleichsgeraden entspricht dem Mittelwert der Zeit, die die Feuchtigkeitsfront benötigt, um die Oberfläche des Probekörpers zu erreichen. Erst anschließend füllt sich der Porenraum des Gesteins bis zur Sättigung. Dieser Vorgang ist offenbar für jede Materialart charakteristisch; wegen der Komplexität der Einflußgrößen scheint seine Deutung indes mit Schwierigkeiten verbunden. Auch kann der Knickpunkt u. U. nur sehr undeutlich ausgeprägt sein.

Der zeitliche Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme eines trockenen Materials, das sich in unmittelbarem Kontakt mit der Feuchtigkeit befindet, läßt sich mit dem Wasseraufnahme-Koeffizienten  $A$  (= water absorption coefficient) beschreiben, der ein Quotient aus der pro Flächeneinheit absorbierte Menge  $m_w$  und der Quadratwurzel der Versuchszeit ist und demzufolge die Einheit  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  hat. B. H. V o s (204) hält diesen Wert für einen der wesentlichen Parameter, die über die im Porenraum ablaufenden Transportvorgänge Aufschluß geben. Welche Bandbreite die entsprechenden Meßwerte vor allem bei Kalksteinen umfassen, wird durch die Arbeiten über französische Vorkommen von P. B o u s q u i é (22) und M. M a - m i l l a n (132) belegt. Ausgangspunkt hierzu mag auch ein für stratigrafische Studien interessanter Versuch von R. H o u p e r t et al. (100a) gewesen sein, die Faziestypen einer Kalkserie im östlichen Pariser Becken anhand von mechanischen Eigenschaften und Porositätsmerkmalen zu differenzieren. Wie aus den Untersuchungen von H. K ü n z e l und B. S c h w a r z (120) geschlossen werden kann, zeigen zusätzlich wirkende Einflußfaktoren wie z. B. die Schwerkraft keine meßbare Auswirkung auf das Saugverhalten der üblichen feinporigen mineralischen Baustoffe, sofern diese keine gröberen Gefügeinhomogenitäten aufweisen. Die Zuverlässigkeit des Koeffizienten  $A$  - der in DIN 52 617 (58) mit dem Symbol  $w$  bezeichnet wird - hängt letzten Endes von der Sicherheit ab, mit der man die Neigung der Geraden festlegen kann, die im ersten Kurvenabschnitt der Wasseraufnahme in der Zeit entspricht, in welcher die Feuchtigkeitsfront den Probekörper durchwandert. Hiervon ist auch die Lage des Knickpunkts ("bubbling point" nach M. B o m b e r g (20)) abhängig, der den zweiten Kurvenabschnitt einleitet.

Nachdem nun eine sichtbare Durchfeuchtung der Oberfläche des Probekörpers eingetreten ist, findet, wenn auch in geringerem Maße als vorher, eine weitere Wasserabsorption statt. Der durch den genannten Punkt markierte Feuchtigkeitsgehalt wird nach einem Vorschlag von H. K ü n z e l (119) als Wasser- oder Feuchtigkeitskapazität  $\psi_k$  bezeichnet ( $\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{Material}$ ). Einen von dieser Größe abgeleiteten Parameter stellt der sogenannte relative Imprägnierungsgrad  $S_t$  gemäß NBN B 05-201 (143) dar. Darunter ist die Wasseraufnahme am Knickpunkt - jedoch bei prozentuaalem Bezug auf die Wasseraufnahme im Vakuum - zu verstehen.

Für die Berechnung des sogenannten Wassereindring-Koeffizienten B (water penetration coefficient) wird die Höhe h des Probekörpers herangezogen. B errechnet sich aus dem Quotienten  $h/\text{Quadratwurzel } t$  (am Knickpunkt!) und hat die Einheit  $\text{m}/\text{s}^{0,5}$ . Diese Beziehung, der eine vereinfachende Betrachtung zugrunde liegt, liefert unter der Voraussetzung eine ausreichende Genauigkeit, daß bei nicht allzu großen kapillaren Steighöhen der Feuchtigkeitsgehalt während des Saugvorgangs hinter der Wasserfront konstant ist und dem Wert der Wasserkapazität entspricht. Sie beschreibt die Wanderungsgeschwindigkeit der Feuchtigkeitsfront durch das Material.  $\psi_k$  erhält man als Quotienten der am Knickpunkt gemessenen Wassermenge  $m_w$  und dem Produkt aus Probenhöhe h und Dichte  $\rho$  von Wasser. B. S c h w a r z (185) bringt die für die Auswertung indes zu vernachlässigende Tatsache, daß der erste Kurvenabschnitt in Richtung höherer Ordinatenwerte verschoben sein kann, mit einem "Anlaufzustand in den ersten Augenblicken des Saugvorganges" in Zusammenhang. "Abhängig von der Porenstruktur der Saugfläche" wird hierbei "sprungartig eine mehr oder weniger große Wassermenge" aufgenommen.

Die für das Probematerial erhaltenen Koeffizienten A und B bewegen sich etwa zwischen 0,001 und 0,5  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  beziehungsweise 0,06 und  $4 \cdot 10^{-3} \text{m}/\text{s}^{0,5}$ . Die Wasserkapazität (=Knickpunktfeuchtigkeit)  $\psi_k$  beträgt zwischen etwa 0,015 und 0,18  $\text{m}^3/\text{m}^3$  sowie  $S_t$  etwa zwischen 0,35 und 0,90.

### 2.3.3 Porengrößenverteilung (Quecksilber-Porosimeter)

#### Grundlage und Ziel der Verfahren

Wesentlich ist die Kennzeichnung solcher Poren, die für Feuchtigkeit zugänglich sind. Eine der hierfür geeigneten Methoden ist die Bestimmung der Porengrößenverteilung mit Hilfe eines Quecksilber-Porosimeters nach A. G u y e r jr., B. B ö h l e n und A. G u y e r (76), die auf der von H. L. R i t t e r und L. C. D r a k e (173) vorgeschlagenen Verfahrensweise beruht. In einem entsprechenden Gerät wird Quecksilber als eine nichtbenetzende Flüssigkeit kontinuierlich in die offenen Poren des Probematerials hineingedrückt und das eingedrungene Volumen bei den verschiedenen Druckstufen gemessen (vgl. auch (213)). Diese Zusammenhänge sowie die Besonderheiten beim Eindringen des Quecksilbers in die Poren zeigt eine Schemaskizze von J. H u n d t (Abb. 2). Außer der einfachen Darstellung der Verteilung lassen sich durch Zuordnung der Volumina zu bestimmten Größenintervallen Kenndaten gewinnen, die u. a. zur Beurteilung des Frostverhaltens von porösem Material herangezogen werden.

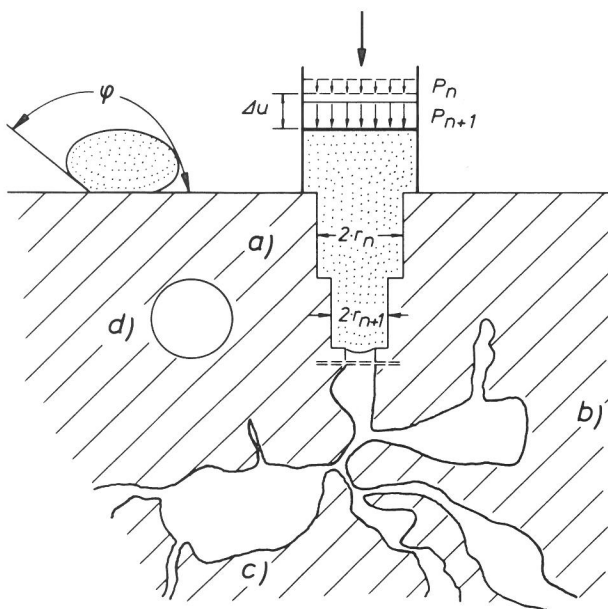


Abb. 2

Schema des Eindringens von Hg in den Porenraum eines mineralischen Baustoffs (102)

- $\varphi$  - Randwinkel von Quecksilber auf nichtmetallischem Material
- a) - Folge von Zylinderporen mit kleiner werdendem Radius  $r$
- $r_n, r_{n+1}$  - Radien aufeinanderfolgender Poren
- $P_n, P_{n+1}$  - Druck nach Füllen der Poren
- $\Delta u$  - Füllen der Pore mit dem Radius  $r_{n+1}$
- b) - Pore mit Flaschenhalszugang
- c) - Pore mit Flaschenhalsöffnungen
- d) - geschlossene Kugelpore

### Anwendungsbereich

In der vorliegenden Arbeit ist ein auf dieser Grundlage arbeitendes, von der Firma CARLO ERBA, Mailand, serienmäßig hergestelltes Gerät mit einem Druckbereich bis 2000 bar für Porenradien zwischen ca.  $6 \cdot 10^3$  nm und 3,75 nm (=Rechenwert) eingesetzt worden. Es verfügt über eine Zusatzeinrichtung zur Erfassung des Bereichs der sogenannten Makro-Poren zwischen ca.  $55 \cdot 10^3$  nm und  $6 \cdot 10^3$  nm Radius. Die Methode liefert zwar eine für das untersuchte Material charakteristische Kurve, die aber mit Sicherheit von der tatsächlichen Porengrößenverteilung abweicht: Als Hauptfehlerquelle ist der Beitrag der Flaschenhals-Poren (vgl. Abb. 2) zum Meßergebnis anzusehen, von denen das gesamte Volumen des "hinter der Einschnürung" befindlichen Raums derjenigen Porengröße zugerechnet wird, die dem Durchmesser dieser Verengung entspricht. Von verfälschendem Einfluß kann aber auch eine Gefügezerstörung durch den hohen Quecksilberdruck sein. Auswertungsschwierigkeiten können sich selbst bei einer Vortrocknungstemperatur von nur 40 °C dadurch ergeben, daß man die durch etwaige Anwesenheit von dehydratationsgefährdeten Bestandteilen hervorgerufenen Veränderungen beispielsweise infolge Rißbildung oder im Zuge der Entstehung von Pseudomorphosen als Poren interpretiert. An dieser Stelle scheint es notwendig, auch einmal deutlich hervorzuheben, daß die Verteilung der Porengrößen allein nicht unbedingt den Schlüssel für weiterführende Aussagen liefert. In der Regel hat das wohl seine Ursache darin, daß Form und Anordnung der Poren von Baustoffen in erster Linie von unterschiedlichen genetischen Prozessen geprägt worden sind (vgl. (37a)) und spezifische geometrische Eigenheiten eine Korrelation mit anderen Parametern erheblich beeinflussen können. Jedenfalls läßt das Porengefüge der verschiedenartigen Gesteine bei einem Vergleich ihrer Eigenschaften keine einfachen Verhältnisse erwarten. In übertragenem Sinne gilt dies natürlich auch für die Ermittlung der spezifischen Oberfläche.

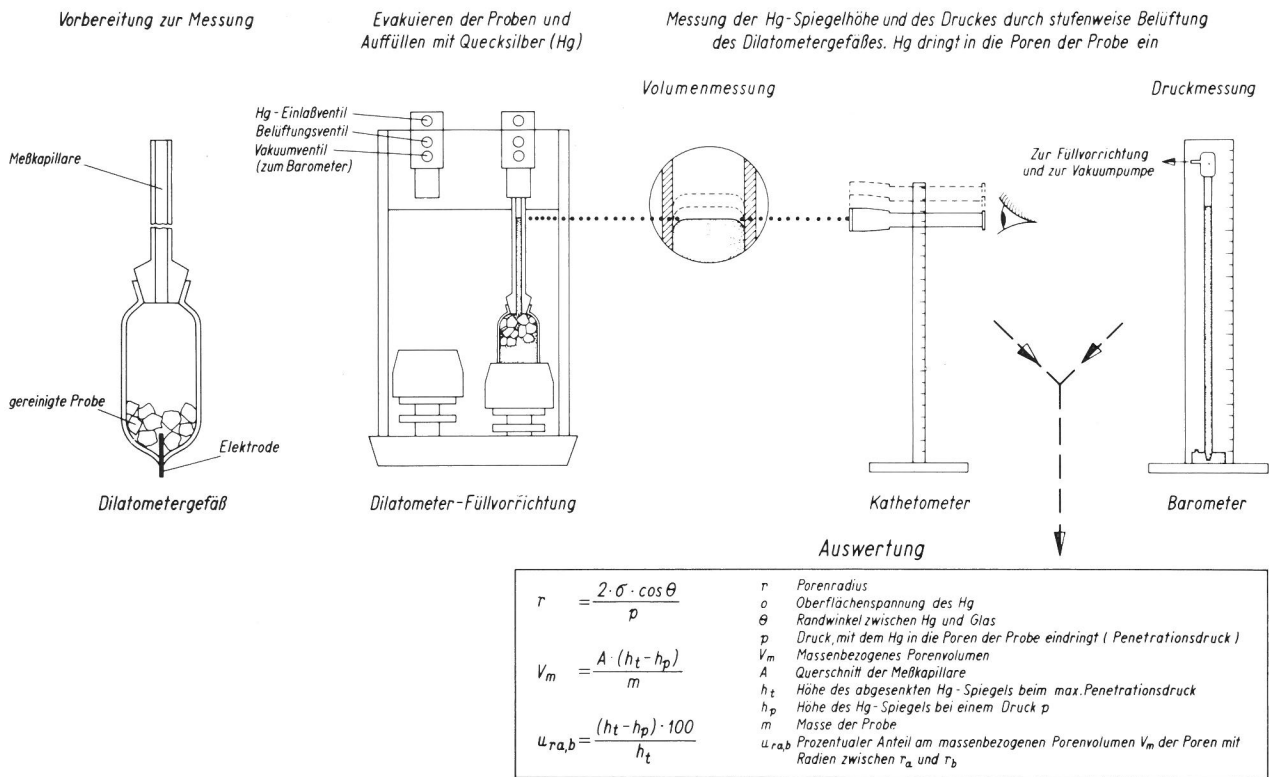


# Prüfverfahren

## Probenvorbereitung

Für die Untersuchung werden je nach Porosität des Probematerials 3 bis 6 g von Bruchstücken einer Korngröße zwischen 3 mm und 5 mm herangezogen. Im Regelfall erfolgt eine Trocknung bis zur Massekonstanz bei  $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ . Wenn Verbindungen wie hydratwasserhaltige Sulfate anwesend sind, wäre demgegenüber das Evakuieren vorzuziehen.

### Bestimmung der Makro-Poren



### Bestimmung der Mikro-Poren

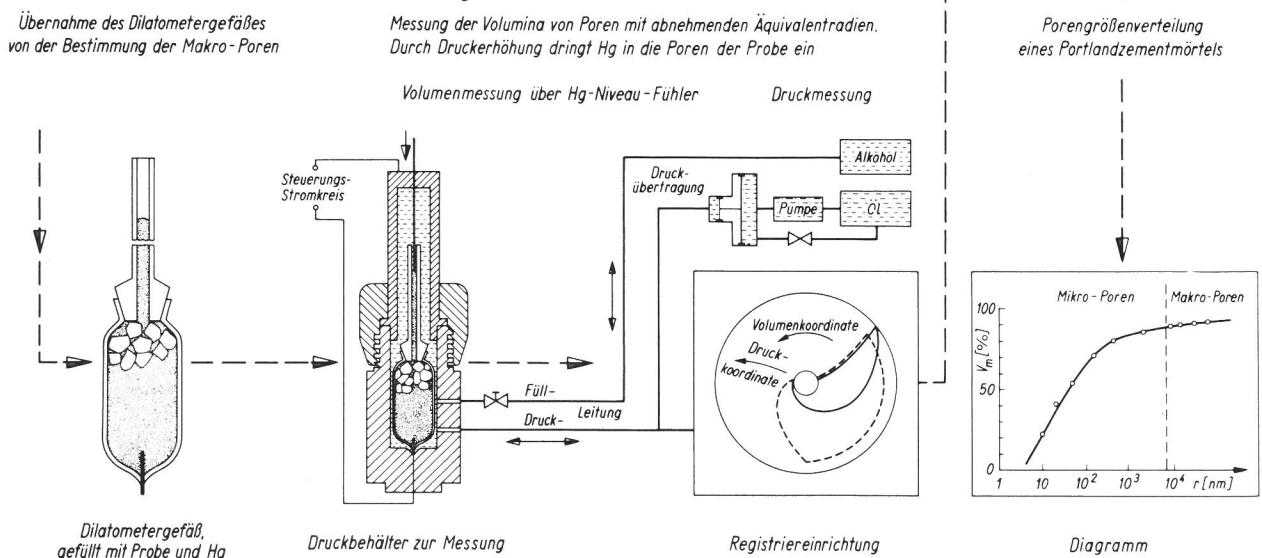


Abb. 3 Schema des Quecksilber-Porosimeterverfahrens (125)

## Funktionsweise

Die Probe wird in ein gläsernes, sogenanntes Dilatometergefäß von 20 cm<sup>3</sup> Inhalt eingebracht. In dessen Boden ist eine Elektrode eingeschmolzen, am Oberteil befindet sich ein genormter Schliff. Hierzu passend wird eine Glaskapillare von 3 mm Innendurchmesser eingesetzt. Nach Evakuieren des Gefäßes bis zu einem Druck von etwa 0,2 mbar füllt man mit Hg bis etwa 1 cm unter dem Rand der Kapillare auf und mißt die Höhe von dessen Spiegel mit Hilfe eines Kathetometers. Infolge anschließender stufenweiser Belüftung dringt Quecksilber abhängig vom Luftdruck in die Probe ein. Das entsprechende Volumen errechnet sich aus der Höhe des Hg-Meniskus bei dem mittels eines Barometers jeweils gemessenen Druck (= Makroporen). Nach Erreichen des Atmosphärendrucks überführt man das Dilatometergefäß in einen Stahlbehälter, in dem durch das mehrstufige hydraulische System ein automatisch geregelter Druckanstieg erzeugt werden kann. Ein Schreiber registriert Druck und Volumen (= Mikro-Poren). Die Eigenkompressibilität des Systems wird im Blindversuch mit einer Quecksilberfüllung bestimmt. Versuchsaufbau und -durchführung gehen aus dem in Abb. 3 gezeigten Schema hervor.

## Darstellung der Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse von Druck- und Volumenmessung werden die Häufigkeitssummen des Porenvolumens in Abhängigkeit vom Logarithmus des Porenradius  $r$  dargestellt. In den meisten Fällen erweist es sich aber als empfehlenswert, zur besseren Veranschaulichung die Häufigkeitsverteilungen - entsprechend der ersten Ableitung  $\Delta V/\Delta r$  der Summenkurve - aufzutragen. Die auf solchem Wege erhaltenen Histogramme lassen im allgemeinen deutliche charakteristische Maxima der Porengrößenverteilung erkennen, deren Lage etwa im Zuge der Verwitterung des betreffenden Gesteins einer systematischen Veränderung unterliegen kann.

An der "Nahtstelle" zwischen den Meßbereichen der Mikro- und Makroporen (bei  $r \approx 6 \mu\text{m}$ ) zeigen sich gelegentlich spontane Abweichungen der Werte nach der Art von Maxima. Schwierigkeiten bei der Deutung eines Verteilungsdiagramms ergeben sich zwangsläufig dann, wenn in dieses Intervall ein nennenswerter Anteil des Porenvolumens fällt.

Die Erfassung des vorgestellten Merkmals im Zusammenhang mit dem behandelten Thema scheint übrigens besonders deswegen attraktiv, weil das "durch die Porengrößenverteilung gekennzeichnete Gefüge oft eine enge Beziehung zu Frostwiderstand und Salzkristallisation aufweist" (180). Neben der Bestimmung der Maxima der Porenradienverteilung existieren weitere Möglichkeiten, wie man Verteilungskurven für eine numerische Bewertung nutzbar machen kann. Eine Handhabe hierfür liefert beispielsweise die im Bericht der Building Research Station BRS von 1933 (33) sowie später von D. B. H o n e y b o r n e und P. B. H a r r i s (99) behandelte "Mikroporosität", worunter der Anteil an offenen Poren  $< 5 \mu\text{m}$  Durchmesser verstanden wird. Angesichts der Tatsache, daß die Gesamtporosität z. B. eines Kalksteins in der Regel keine befriedigende Aussage liefern kann, weil die kleineren Hohlräume weit eher am Zerstörungsmechanismus teilhaben als die größeren, hat A. S. R u s s e l l (vgl. (79), S. 34-36) auf mikroskopischem Wege ihren Anteil oberhalb eines willkürlich festgelegten Durchmessers von  $5 \mu\text{m}$  bestimmt und von der Gesamtporosität subtrahiert. Der auf das ganze Volumen bezo-

gene, in Prozent ausgedrückte Wert soll sich besonders bei Gesteinen, die untereinander ähnlich sind, bewährt haben. In der vorliegenden Arbeit ist unter Verwendung dieses Grenzwerts ein entsprechendes Ergebnis aus dem mit Hilfe des Quecksilber-Porosimeters erfaßten Spektrums erhalten worden. Nicht zuletzt wird von H. G. F. W i n k l e r (212) die von ihm vermutete mangelnde Eignung des S-Werts zur Einschätzung des Frostverhaltens von Dachziegeln auf eine unzureichende Berücksichtigung jener Verteilung zurückgeführt. So gibt dieser Autor als kritische Grenze einen Äquivalentdurchmesser von  $0,8 \mu\text{m}$  an, oberhalb dessen wenigstens etwa 30 Volumenanteile in % vorhanden sein müssen, falls das Material frostwiderstandsfähig sein soll.

Als weiteres Einteilungskriterium ist der mittlere kritische Durchmesser  $d_{10m}$  zu nennen, der nach R. d'H a v é und H. M o t t e u (85), (86) ein charakteristisches Merkmal von frostempfindlichen bzw. -unempfindlichen keramischen Baustoffen darstellen soll. Die oberste 10%-Fraktile vom Volumen des gesamten, mit Hilfe des Hg-Porosimeterverfahrens erfaßbaren Hohlraums dient als Grundlage für das Auffangen der beim Gefrieren des Wassers stattfindenden Ausdehnung, was nur dann gewährleistet sein soll, wenn der entsprechende Porendurchmesser oberhalb von  $3 \mu\text{m}$  liegt. Demgegenüber ist für nicht frostwiderstandsfähiges Material angabegemäß eine Grenze von  $2 \mu\text{m}$  kennzeichnend. Dieser Sachverhalt wird durch Ergebnisse an Dachziegeln (190) grundsätzlich bestätigt, weist jedoch mitunter "Unschärfen" bei der Grenzziehung auf. Zweifel an ihrer universellen Anwendbarkeit kommen allerdings auch bei dieser Methode auf, denn die 10%-Fraktile soll bei den Baustoffen über weite Bereiche streuen können und dabei von unterschiedlicher Zuverlässigkeit sein (5), (68). Die Untergrenze des für die Frosteinwirkung in Frage kommenden Größenintervalls ist dadurch gegeben, daß Wasser in sehr feine Poren nicht eindringt oder aber zum nicht gefrierbaren Anteil gehört. Eine Obergrenze besteht da, wo gröbere Poren die Tendenz zeigen, sich nicht vollständig mit Wasser zu füllen ((164), S.18). Demnach würde der dazwischen liegende Bereich für eine Frostschädigung wesentlich sein. Während G. G. L i t v a n (127) für den Frostangriff auf ein poröses Kieselglas vorrangig den Größenbereich zwischen 8 nm und 60 nm verantwortlich macht, haben A. R a v a g l i o l i und G. V e c c h i (165), (166) einen solchen für klassische keramische Erzeugnisse mit  $0,25$  und  $1,4 \mu\text{m}$  Durchmesser angegeben. Dieser wird ebenfalls als Anteil am Gesamtporenraum ausgedrückt und hier vereinfachend als "R-Intervall" bezeichnet. Darunter sollen keinerlei Frostschäden und diese darüber nur in strengen Klimaten auftreten. Die Frage, unter welchen Bedingungen bzw. Einschränkungen sich ein solcher Parameter auf das grundlegend andersartige Gefüge und den Porenaufbau von Sedimentgesteinen übertragen läßt, hat bislang jedoch in Ermangelung ausreichender Erfahrungen offenbleiben müssen. Schließlich besteht auch noch die Möglichkeit, die Histogramme willkürlich in charakteristische, auf jedem einzelnen Diagramm immer wiederkehrende Abschnitte zu unterteilen, um deren Zusammenhang mit anderen Kennwerten anhand der so begrenzten Bereiche zu verfolgen.

Die das untersuchte Material kennzeichnenden Intervalle befinden sich für die Mikroporosität zwischen etwa 20 und 93 Volumenanteilen in %, für  $d_{10m}$  zwischen etwa  $0,4$  und  $75 \mu\text{m}$  sowie für das "R-Intervall" zwischen etwa 5 und 45 % .

## 2.3.4 Luftpermeabilität

### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Im Hinblick auf den Transport von flüssigen und gasförmigen Medien ist die durchströmbare Porosität ein wesentliches Merkmal. Als ein Maß hierfür dient die Gasdurchlässigkeit, die mittelbar auch Schlüsse auf die Widerstandsfähigkeit eines Baustoffs zuläßt. Man versteht darunter die Eigenschaft poröser Medien, bei einem angelegten Druckunterschied Gase durchströmen zu lassen. Knudsen'sche Molekularbewegung sowie Diffusion dürfen hiermit nicht verwechselt werden. Experimentell wird die Gasdurchlässigkeit oder -permeabilität am besten dadurch erfaßt, daß man bei einer definierten Druckdifferenz die Gasmenge ermittelt, die eine Schicht des Probematerials in der Zeiteinheit durchdringt. Der so erhaltene Wert, der sich bei Vorliegen geeigneter Meßdaten übrigens auch medienunabhängig unter Zuhilfenahme der sogenannten KLINKENBERG-Korrektur (vgl. z. B. (169)) darstellen läßt, ist zur Kennzeichnung näherungsweise homogener, poröser Baustoffe geeignet.

### Anwendungsbereich

Der Laborversuch wird an Materialien mit nennenswerter offener Porosität durchgeführt und gestattet neben der Bestimmung eines materialspezifischen Parameters in einigen Fällen auch die Kontrolle von Veränderungen des durchströmbaren Porenraums, wie sie im Zuge von Verwitterungsprozessen insbesondere im Oberflächenbereich des Baustoffs stattfinden. So betrachtet etwa W. A. M c I n t y r e (137) die Wasserverdampfung als ein von der Materialpermeabilität abhängiges Merkmal und bringt auf diesem Wege die Kristallisation von löslichen Salzen mit der Verwitterung in Zusammenhang. Für die Durchführung des Versuchs erweist es sich als unerläßlich, daß das Gestein nicht zu bröckelig, der durchströmte Weg in der Probe lang genug und die Druckdifferenz zwischen Eintritts- und Austrittsfläche des Probekörpers nicht zu groß ist, um ein annähernd laminares Fließen zu gewährleisten. Auch muß eine optimale seitliche Abdichtung des Zylindermantels sichergestellt sein (vgl. z. B. die Einspannvorrichtungen nach DIN 51 058 (45) und TGL 13 724 (199)).

### Prüfverfahren

#### Probenvorbereitung

Für den Versuch werden in der Regel zylindrische Probekörper von 50 mm  $\emptyset$  und 50 mm Höhe verwendet. Ihre Endflächen soll planparallel und sauber sein. Bei der Präparation ist darauf zu achten, daß erkennbare Inhomogenitätsflächen (z. B. Sedimentationsebenen) jeweils senkrecht oder aber waagrecht zur Probenachse verlaufen. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, von jedem Material wenigstens drei Probekörper zu untersuchen, jedoch ist die tatsächliche Anzahl von dessen Homogenität abhängig zu machen. Die Herstellung erfolgt meist mit einem diamantbesetzten Hohlbohrer und durch nachträgliches "planparalleles" Schleifen der Endflächen mit anschließender sorgfältiger Reinigung. Bei der erforderlichen Trocknung bis zur Massekonstanz muß, falls wasserhaltige Salze wie etwa Sulfathydrate anwesend sind, deren Neigung zur Wasserabspaltung berücksichtigt werden.

## Funktionsweise

Die Meßanordnung besteht im wesentlichen aus einer Zelle, die eine vollständige seitliche Abdichtung an der Mantelfläche des Probezylinders gewährleistet, was mitunter durch Anwendung einer auf die Mantelfläche gepreßten gasundurchlässigen Gummimanschette erzwungen werden muß. Im vorliegenden Fall wird Luft aus einer Druckflasche entnommen und durch Zwischenschalten eines Feuchtigkeitsabsorptionsgefäßes mit Kieselgel vorgetrocknet. Ihr Volumen kann auf verschiedene Weise bestimmt werden, z. B. mit Hilfe von: Differenzdruckmesser nach RIESENFELD; Gasmengenmeßgerät nach dem Schwebekörperprinzip; Seifenblasen-Strömungsmesser nach TUNN (vgl. (155)). Die erforderlichen Drücke werden mit Hilfe von Reduzier- und Feindruckventilen eingestellt und die Druckdifferenzen zwischen den beiden Endflächen des Probekörpers beispielsweise mit Hilfe eines U-Rohrmanometers kontrolliert.

Den bis zur Massekonstanz getrockneten Probekörper spannt man in die Meßzelle ein. Aus der Stahlflasche strömt die mit einem Reduzierventil grob regulierte Luft zunächst über einen Feindruckregler und dann durch den Probekörper, wobei unter Beobachtung des U-Rohrmanometers zwischen beiden Probenenden ein definierter Differenzdruck eingestellt wird. Die Messung der den Probekörper durchströmenden Gasmenge erfolgt hier meist mit einem Seifenblasen-Gerät. Die Wahl eines der kalibrierten Zählrohre von 4; 20 oder 100 cm<sup>3</sup> Volumen hängt vom Gasdurchsatz in der Zeiteinheit ab. Nachdem mittels eines Gummigebläses im Steigrohr des Glasgefäßes Seifenblasen erzeugt worden sind, wird mit einer Stoppuhr deren Laufzeit von der unteren bis zur oberen Eichmarke gemessen. Aus langjährigen Erfahrungen (155) geht hervor, "daß die günstigste Druck/Meßvolumen-Kombination dann gewählt ist, wenn die Meßzeiten über 20 s liegen". Da für die Auswertung wesentlich ist, daß die Messung im Bereich laminarer Strömung stattfindet, müssen die in Abhängigkeit vom Druck bei drei verschiedenen Differenzen  $\Delta p$  für den Volumenstrom erhaltenen Werte auf einer Geraden liegen. Die Dichtheit des Systems ist z. B. mit Hilfe eines Metallzylinders ständig neu zu überprüfen.

## Darstellung der Ergebnisse

Zur Berechnung der spezifischen Gasdurchlässigkeit  $D_s$  aus Ergebnissen von Messungen mit trockener Luft - hier einfach Luftpermeabilität genannt - dient die DARCY-Gleichung für kompressible Medien, bei der sich das die Probe durchströmende Gas-Volumen proportional mit abnehmender Druckdifferenz vergrößert. Diese lautet:

$$D_s = \frac{\eta \cdot h \cdot V}{A \cdot t \cdot p} \cdot \frac{2p_A}{(p_E + p_A)} \cdot 10^4 \text{ nPm.}$$

Dabei bedeuten:

- $\eta$  dynamische Viskosität in  $N \cdot s \cdot m^{-2}$
- $h$  Probenhöhe in cm
- $V$  durch den Probekörper geströmtes Gasvolumen in cm<sup>3</sup>
- $A$  Querschnittsfläche des Probekörpers in cm<sup>2</sup>
- $t$  Meßzeit in s
- $\Delta p$  Druckdifferenz  $p_E - p_A$  in bar
- $p_E$  Druck an der Eintrittsfläche in bar
- $p_A$  Druck an der Austrittsfläche in bar  
(i.a. Luftdruck  $\approx 1$  bar).

Neben der Berücksichtigung des Temperatureinflusses bei der Viskosität des Meßgases ist in der Formel auch ein Korrekturglied enthalten, das von der Größe der Druckdifferenz  $\Delta p$  abhängt. Die Luftpermeabilität wird zweckmäßigerweise in der Einheit Nanoperm nPm ( $= 10^{-9}$  Pm) angegeben (Zu der früher gebräuchlichen Angabe in Millidarcy mdy gelangt man durch Multiplikation mit dem Faktor 101,3).

Die Luftpermeabilität der untersuchten Bausteine liegt etwa zwischen  $5 \cdot 10^{-3}$  und 100 nPm.

### 2.3.5 Spezifische Oberfläche (Gasadsorption)

#### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Unter der spezifischen Oberfläche  $\Sigma$  soll hier die Gesamtheit der Grenzflächen eines porösen Körpers verstanden werden, soweit diese für die Sorption eines Gases zugänglich sind. Der entsprechende, auf die Masse oder das Volumen eines Materials bezogene Wert ist besonders deshalb von Interesse, weil er z. B. Aussagen über die Größe der an Reaktionen beteiligten Oberflächen ermöglicht. Vorbedingung für die Messung ist, daß es gelingt, eine einschichtige Belegung mit den Molekeln bzw. Atomen des Meßgases auf der gesamten Sorptionsoberfläche - eine sogenannte Monoschicht - zu erzeugen, die es gestattet, aus dem zweidimensionalen Platzbedarf des adsorbierten Gases auf die von ihm bedeckte Oberfläche zu schließen. Als Grundlage hierfür dient die physikalische Adsorption von Argon bei der Umgebungstemperatur des flüssigen Stickstoffs ( $T = 77,3$  K;  $\vartheta = -195,8$  °C). Bei dem dazu angewendeten Gerät AREATRON der Firma Leybold-Heraeus wird von der mit Hilfe der B E T - Methode (30) erhaltenen Adsorptionsisotherme jedoch lediglich ein Punkt zur Bestimmung herangezogen.

#### Anwendungsbereich

Das vorzugsweise für die Erfassung der Oberflächengröße feinteiliger Stoffe bekannte Verfahren kann auch zur Charakterisierung von porösen Baustoffen eingesetzt werden. Wenn das Material flüchtige Bestandteile enthält, wird indes die Aussagekraft der Prozedur in Frage gestellt. So können z. B. der in der Oberflächenschicht eines kalkhaltigen Baustoffs entstandene Gips oder andere Sulfate ihr Hydratwasser verlieren, so daß erst auf diesem Wege neue Oberflächen entstehen. Das Gasadsorptionsverfahren eignet sich demzufolge also wesentlich eher dazu, unverwitterte Gesteine miteinander zu vergleichen.

#### Prüfverfahren

##### Probenvorbereitung

Die für die Untersuchung erforderliche Masse an kleinstückigem Probematerial richtet sich nach der zu erwartenden spezifischen Oberfläche. In das Probengefäß soll davon aber nur so viel eingefüllt werden, daß der eigentliche Meßvorgang etwa 1/2 h bis 3 h in Anspruch nimmt. Es empfiehlt sich, das Gestein bis zur Massekonstanz vorzutrocknen.



## Funktionsweise

Das Einfüllrohr des mit einer definierten Substanzmenge beschickten, aus einem Glaskolben bestehenden Probengefäßes wird mit etwas Kieselglaswolle fest verstopft, die Probe im Vakuum automatisch aufgeheizt, dadurch entgast und anschließend abgekühlt. Über eine Meßkapillare strömt dann Argon mit konstanter Geschwindigkeit ein, bis ein Gleichgewichtsdruck von 80 mbar erreicht ist. Dies dient als Maß für das adsorbierte Gasvolumen. Die Oberflächengröße wird vom Gerät digital in  $m^2$  angezeigt (80). Als Eichsubstanz findet chemisch reines Zinkoxid (Type I) Verwendung.

## Darstellung der Ergebnisse

Die in  $m^2$  erhaltene Oberfläche wird auf die Masse oder das Volumen der Probe bezogen. Da das Porengefüge eines Baustoffs sowohl bei "natürlicher" Verwitterung als auch künstlicher Bewitterung verändert werden kann, liefern entsprechende Werte mitunter auch für chemische Umsetzungen interessante Anhaltspunkte, wobei deren Interpretation allerdings mit der gebotenen Vorsicht erfolgen sollte.

Die volumenbezogenen Werte der hier untersuchten Gesteine betragen für  $\Sigma_v$  zwischen etwa 2 und  $25 \cdot 10^6 m^2/m^3$ .

## 2.4 Festigkeitseigenschaften

Es ist bekannt, daß Verwitterungsvorgänge von Naturstein meist mit einer Schwächung der Kornbindung ggf. bei gleichzeitiger Zersetzung des Feldspats - ganz allgemein aber mit der Verringerung von Festigkeitseigenschaften - Hand in Hand gehen. Dies trifft in vergleichbarer Weise auch für das Langzeitverhalten magmatischer Gesteine zu. So hat etwa I. G. I l i e v (103) einen "Verwitterungskoeffizienten" aus dem Verhältnis der Schalllaufzeiten in bruchfrischem Material und in dessen verwittertem Äquivalent zu errechnen versucht.

### 2.4.1 Druckfestigkeit

#### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Unter der Druckfestigkeit  $\sigma_u$  versteht man den Quotienten aus der Höchstkraft  $F_{max}$  und dem Ausgangsquerschnitt  $A_0$  einer Probe, die "einer einachsigen, über den Probenquerschnitt möglichst gleichmäßig verteilten, langsam und stetig zunehmenden Druckbelastung bis zum Bruch unterworfen" wird (53). Neben einer Prüfung im lufttrockenen Zustand sind hier außerdem Versuche von Interesse gewesen, bei denen das Material im wassergesättigten Zustand (Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nach DIN 52 103 (49)) vorgelegen hat. Weiterhin ist die Druckfestigkeit an Probekörpern ermittelt worden, die aus dem Frosttauwchselversuch gemäß DIN 52 104 (51) stammen. Die letzten beiden Varianten waren übrigens früher sogar Bestandteil von DIN 52 105 (52).

## Anwendungsbereich

Bei Vorhandensein einer geeigneten Prüfmaschine gibt es für die Auswahl des Probematerials praktisch keine Beschränkung. Allerdings sind ein Mindestmaß an Zusammenhalt und eine Mindestgröße gefügemäßig einheitlicher Bereiche erforderlich. Bereits von H. W. B u r r o w s (35) stammen Bemerkungen zur Gefügeanisotropie mechanischer Eigenschaften, die im Falle von Bausteinen mit sedimentationsbedingter Textur beispielsweise durch die Druckfestigkeit in den verschiedenen Raumrichtungen zum Ausdruck kommt.

## Prüfverfahren

### Probenvorbereitung

Zur Prüfung dienen Würfel einer Kantenlänge von  $(50 \pm 2)$  mm, deren senkrecht zur Probekörperachse stehenden Flächen in der Regel eben und parallel zueinander geschliffen werden müssen. Sofern Vorzugsrichtungen im Gestein wie z. B. s-Flächen erkennbar sind, ist versucht worden, diese möglichst parallel zu den Druckflächen verlaufen zu lassen. Obwohl DIN 52 105 (53) zur Mittelwertbildung "mindestens 5 Proben aus einem Probekblock gleicher Richtung" vorschreibt, sind im vorliegenden Fall wegen Materialmangels nur jeweils 3 Probewürfel im lufttrockenen und wassergesättigten Zustand geprüft worden.

### Funktionsweise

Verwendet wird eine Prüfmaschine nach DIN 51 223 (47) mit der erforderlichen Druckvorrichtung, die den Anforderungen der Klasse 2 nach DIN 51 220 (46) entspricht. Man bestimmt zunächst den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  auf  $0,1 \text{ cm}^2$  genau. Bei zentrischer Anordnung zwischen den Druckplatten und gleichmäßigem Belastungsanstieg soll der Bruch des Probekörpers etwa innerhalb von 60 - 90 s eintreten.

## Darstellung der Ergebnisse

Die gemessene Höchstkraft - sie entspricht der Bruchkraft  $F_{\max}$  des Probekörpers - teilt man durch den Ausgangsquerschnitt  $A_0$ , um so die Druckfestigkeit  $\sigma_u$  für das lufttrockene Material zu erhalten, die auf  $1 \text{ N/mm}^2$  gerundet wird. Zur Unterscheidung davon ist die im wassergesättigten Zustand mit  $\sigma_{u(w)}$  bezeichnet worden. L. O b e r t et al. (151) haben den Einfluß unterschiedlicher Feuchtigkeitsgehalte auf die Festigkeit experimentell verfolgt und für wassergesättigte Sedimentgesteine eine Erniedrigung bis zu 30 % gegenüber den im Wärmeschrank getrockneten beobachten können. Dies gilt in ähnlichem Maße für die von P. S. B. C o l b a c k und B. L. W i i d (38) veröffentlichten Ergebnisse. Ein Quotient der Festigkeitswerte  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  hat sich gleichfalls als brauchbar erwiesen. Bereits von L. T e t m a j e r (198) ist dieses Verhältnis im Zusammenhang mit der "Frost- und Wetterbeständigkeit" von natürlichen und künstlichen Bausteinen als "Beständigkeitscoefficient" bezeichnet und sowohl für die Klassifizierung von frischem Material als auch zur Kennzeichnung des Beanspruchungsfortschritts nach mehreren Frosttauwechseln herangezogen worden. Zuverlässige Verknüpfungen dieses Parameters mit anderen Merkmalen sind aber keinesfalls problemlos, zumal sich nicht immer schlüssige Erklärungen für ein solches "Erwei-



chungsverhalten" anbieten. Das hat man besonders für Mauerziegel schon früh erfahren müssen (153). Die erwähnte Verhältniszahl ist auch neuerdings wieder in Form des "Erweichungskoeffizienten" zur Charakterisierung von Sandsteinen benutzt worden ( C. F é l i x (65)).

Die für das Probematerial erhaltenen Werte bewegen sich für  $\sigma_u$  etwa zwischen 20 und 200 N/mm<sup>2</sup> bzw. für  $\sigma_{u(w)}$  zwischen 5 und 140 N/mm<sup>2</sup>.  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  beträgt 0,4 bis 0,9.

#### 2.4.2 Oberflächenhärte (Eindruckverfahren)

##### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Die ursprünglich für die Erfassung der Härte von Baugips entwickelte Methode nach DIN 1168 (44) wird im Rahmen dieser Arbeit gleichfalls zur Gewinnung von Anhaltspunkten für die Gefügefestigkeit des jeweiligen Gesteins herangezogen. Den erhaltenen Kennwert kann man nach W. A l b r e c h t (2) folgendermaßen definieren: Er ist der Widerstand des Materials gegen ein weiteres Eindringen einer statisch belasteten Kugel vom Durchmesser  $d$ , bezogen auf die Kalottenoberfläche  $\pi dh$ , die sich aus der bleibenden Eindringtiefe  $h$  eines Vorkraftein-drucks - hervorgerufen durch die Prüfkraft - errechnet.

Erleichtert wird das Verständnis für die physikalische Bedeutung einer solchen Beanspruchungsart z. B. durch die von D. T a b o r (196) formulierte Annahme, daß bei den meisten mineralischen Werkstoffen die erhöhten hydrostatischen Drücke im Deformationsbereich der Probe in der Regel ausreichen, um einen Sprödbruch zu verhindern, weshalb sowohl Eindruck- als auch Ritzhärte Merkmale des plastischen Materialverhaltens sein können. Ein bekanntes Beispiel von technischer Bedeutung liefert das Steinsalz. Entsprechende experimentelle Ergebnisse von R. F. K i n g und D. T a b o r (114) an plattenförmigen Probekörpern zwischen Druckstempeln aus Glas machen jedenfalls glaubhaft, daß unter dem dabei erzeugten Druck Fehlstellen bzw. Mikrorisse ausheilen und die Sprödigkeit des Materials abgebaut wird.

##### Anwendungsbereich

Dieser Laborversuch wird vorzugsweise an wenig- bis mittelfesten Materialien durchgeführt. Das Ergebnis ist ein materialspezifischer, aber nur innerhalb des hier angewandten Systems gültiger Kennwert, die sogenannte Makrohärte.

##### Prüfverfahren

###### Probenvorbereitung

Zur Prüfung dienen Proben mit möglichst ebenen Oberflächen, wobei der Abstand zwischen der Randbegrenzung und einem Eindruck sowie zwischen den Eindrücken untereinander jeweils mindestens 1 cm betragen soll. An den "gebrauchten", vom

Schleifverschleiß nach BÖHME stammenden, meist noch nicht weniger als 3 cm dicken Restkörpern (vgl. Abschnitt 2.4.3) lassen sich Werte sowohl senkrecht zur s-Fläche als auch parallel dazu ermitteln. Das Material wird im allgemeinen bei  $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz getrocknet.

#### Funktionsweise

Das Verfahren findet man in der genannten Norm ausführlich behandelt. Da diese indes ein Gerät vorschreibt, das nur eine maximale Prüfkraft von 200 N erreicht, macht die Untersuchung der in Frage kommenden Gesteinsproben eine Erweiterung des Beanspruchungsbereichs bis auf 10 kN notwendig. Zu diesem Zweck ist eine entsprechende Zusatzvorrichtung für die Prüfpresse entwickelt worden.

Die große Streuung der Einzelwerte erfordert eine Vielzahl von Eindrücken, damit man den Kennwert mit der nötigen Sicherheit angeben kann. Um eine zeitraubende Bestimmung des Eindruckdurchmessers zu vermeiden, wird hier das ROCKWELL-B-Härteprüfgerät mit einer Tiefen-Meßeinrichtung angewendet. Die Auswertung erfolgt aber nach BRINELL, wobei jedoch die Eindringtiefe der Kugel als Maß für den Durchmesser des Eindrucks angesehen wird. Es handelt sich demnach um eine "Tiefenmessung nach Rockwell mit 1 kg Vorlast und Errechnung der Härte nach Brinell" (2) oder "als Ausweg (um) die Ermittlung der Brinellhärte aus der Eindringtiefe der Kugel" (142).

Die Fehler der Nullpunkteinstellung für die Tiefenmessung werden durch die Prüfvorkraft  $F_0$  (hier 10 N) vermieden. Die mit Hilfe des Geräts erzeugte Prüfkraft  $F_1$  beträgt 200 N; der Durchmesser  $d$  der als Eindringkörper dienenden Stahlkugel 10 mm. Die Zusatzeinrichtung für die Bestimmung der Härte an festeren Materialien ist grundsätzlich damit vergleichbar, gestattet indessen nicht das Aufbringen einer Vorkraft. Zunächst wird die Stahlkugel mit  $F_0$  und nach Einstellung der Meßuhr auf Null dann innerhalb von 2 s mit  $F_1$  belastet und diese 15 s aufrechterhalten. Die Ablesung der bleibenden Eindringtiefe erfolgt etwa 15 s nach Wegnahme der Kraft und wird mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01$  mm an je 9 Eindrücken senkrecht und parallel zur s-Fläche vorgenommen. Außerhalb des Meßbereichs des in der Norm erwähnten Geräts muß man eine Prüfkraft wählen, die für einen Kugeleindruck von mindestens 0,1 mm Tiefe erforderlich ist.

#### Darstellung der Ergebnisse

Die "Makrohärte" wird als Quotient aus der Prüfkraft  $F_1$  und der Kalottenoberfläche des Kugeleindrucks aufgefaßt und bei Benutzung des in der Norm aufgeführten Geräts durch Dividieren von 0,00637 durch den Mittelwert der bleibenden Eindringtiefe  $h$  in  $\text{N/mm}^2$  erhalten. Bei der Mittelwertbildung bleiben Eindrücke unberücksichtigt, bei denen offensichtlich Poren von der Stahlkugel getroffen worden sind.

Die für das Probematerial erhaltenen Werte schwanken etwa zwischen 40 und  $2500 \text{ N/mm}^2$ .

### 2.4.3 Verschleißprüfung (Schleifscheibe nach Böhme)

#### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Diese Methode des Schleifverschleißes (früher "Abnutzbarkeit durch Schleifen" genannt) dient der Kennzeichnung des Verhaltens anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe. Sie wird in DIN 52 108 (54) im Detail beschrieben. Die entsprechende Prozedur ist schon im vergangenen Jahrhundert auf Zementmörtel und Naturstein angewandt worden ((17), (18), (117)). Auch A. H a n i s c h (78) hat über dieses Verfahren berichtet sowie einen "Verbrauchskoeffizienten" definiert, der aus der Quadratwurzel des Quotienten Verschleiß/Druckfestigkeit erhalten wird und einen "Vergleich, betreffend die Verwendbarkeit verschiedener Steingattungen zur Pflasterung" erlauben soll. Weitere Spielarten einer solchen Beanspruchung wie etwa der Gebrauch einer Maschine nach BAUSCHINGER sind bekannt und haben sich auch bewährt (vgl. (14), (69), (201)). Eine vergleichende Darstellung der beiden Verfahrenstypen gibt über deren Eigenarten Auskunft (70).

#### Anwendungsbereich

Der Versuch wird zur Ermittlung eines materialspezifischen, nur innerhalb des hier eingesetzten Systems gültigen Werts durchgeführt und eignet sich besonders für die Charakterisierung des Verschleißverhaltens von mittelfestem bis festem Material.

#### Prüfverfahren

##### Probenvorbereitung

Zur Prüfung dienen plattenförmige Probekörper mit quadratischem Querschnitt ( $71 \pm 1,5$ ) mm, was einer Verschleißfläche von  $50 \text{ cm}^2$  entspricht. Die ebene Gegenseite muß parallel dazu verlaufen, was sich durch Schneiden und/oder Schleifen erreichen läßt. Bei Material mit ausgeprägten Vorzugsrichtungen, wie z. B. Sandsteinen, erweist es sich häufig als zweckmäßig, die erkennbaren Sedimentationsflächen im Baustoff jeweils senkrecht oder parallel zur Verschleißebene verlaufen zu lassen. Der verfahrensspezifischen Anpassung der beaufschlagten Oberfläche, dem sogenannten Einlaufverschleiß, wird durch Vorschleifen auf dem Gerät Rechnung getragen. Vor dem Versuch ist das Probematerial im allgemeinen bei  $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz zu trocknen.

##### Funktionsweise

Das Verschleiß-Prüfgerät nach BÖHME - kurz Böhmesc Scheibe genannt - besteht im wesentlichen aus einer gußeisernen Scheibe mit ringförmiger Schleifbahn, einer Haltevorrichtung für die Probe und einer Belastungseinrichtung (vgl. DIN 52 108). Die Schleifbahn wird mit 20 g eines Normschleifmittels gleichmäßig bestreut, der Probekörper dann mit der der Scheibenunterseite zugewandten Prüf- fläche in die Haltevorrichtung eingesetzt und mittig belastet. Im Anschluß an jede der 16 geforderten Prüfperioden von jeweils 22 Umdrehungen wird nach gründlicher Säuberung der Scheibe und des Probekörpers sowie Drehen der Verschleißfläche um einen rechten Winkel neue Schleifkörnung aufgestreut. Manuell

ist dafür zu sorgen, daß der Korund stets gleichmäßig über die Schleifbahn verteilt bleibt.

### Darstellung der Ergebnisse

Der Verschleißbetrag läßt sich entweder als mittlerer Dickenverlust oder Volumenverlust (Quotient aus Masseverlust und Rohdichte) nach 16 Prüfperioden angeben. Da das Schleifmittel dermaßen vom Abrieb durchsetzt werden kann, daß eine lineare Proportionalität des Verschleißvorgangs nicht mehr gewährleistet ist (vgl. Abb. 3 in (150)), wird die Aussagefähigkeit des Verfahrens bei der Prüfung von weniger festem Material fragwürdig. Man kann die Umdrehungszahl auch nicht beliebig verringern, da sonst der Einlaufverschleiß zu Beginn jeder Prüfperiode die Ergebnisse zu stark beeinträchtigt. Wegen seiner besseren Reproduzierbarkeit ist der Dickenverlust in der Regel dem Volumenverlust vorzuziehen, besonders weil letzterer gelegentlich durch unkontrollierbares Abbröckeln beeinflusst werden kann. Das Ergebnis errechnet sich aus dem Mittelwert der Einzelmessungen.

Die für das Probematerial erhaltenen Dickenverluste bewegen sich etwa zwischen 1,5 und 25 mm.

#### 2.4.4. Oberflächenverschleißprüfung (BAM-Verfahren)

### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Es hat bisher an einer Methode gefehlt, die es erlaubt, die mechanischen Gefügeeigenschaften von nicht sehr festen, näherungsweise homogenen Sand- und Kalksteinen zu kennzeichnen und mit anderen Materialeigenschaften und -merkmalen in Beziehung zu setzen, da das Verfahren nach Abschnitt 2.4.3 nicht immer befriedigende Ergebnisse liefert. Aber auch im Sinne einer Charakterisierung von Schichten unterschiedlicher Gefügefestigkeit, wie sie beispielsweise in der Oberflächenzone von angewitterten Bausteinen anzutreffen sind, ist die Erfassung eines geeigneten mechanischen Parameters von Interesse. Für die Lösung einer solchen Aufgabe hat sich die hier behandelte Bestimmung des Schleifverschleißes - oder genauer des Widerstands eines Materials gegen Beanspruchung durch Oberflächenverschleiß - als erfolgversprechend erwiesen. Zu diesem Zweck ist in der Bundesanstalt eine Vorrichtung entwickelt worden (97), die sich unterdessen gut bewährt hat (98), (150). Sie wird mit Hilfe des Spanntellers des vom Porcelain Enamel Institute of America (vgl. die US-Norm ASTM C 448-64 (1972 (12))) empfohlenen P.E.I. Abrasion Tester in Bewegung versetzt. Das Verfahren beruht auf der Beziehung zwischen dem Material, das bei Einsatz eines frei beweglichen Schleifkörpers mit Hilfe von nicht gebundenen Schleifmittelkörnern aus der Oberflächenschicht eines Körpers entfernt wird, und dessen mechanischer Festigkeit.

### Anwendungsbereich

Dieser Labortest läßt sich vorzugsweise auf wenig- bis mittelfeste Baustoffe anwenden und gestattet neben der Gewinnung eines materialspezifischen, aber nur

innerhalb des hier benutzten Verschleißsystems gültigen Werts die Aufstellung von Profilen unterschiedlicher mechanischer Festigkeit. Für die Durchführung des Versuchs ist es unerlässlich, daß die Probekörper nicht zu bröckelig und ihre Oberflächen hinreichend plan sind. Außerdem sollen die Schleifmittelkörner im Durchschnitt nicht wesentlich kleiner sein als die Gefügekörner, die Poren des Baustoffs und ggf. die abgetragenen Teilchen. Diese Verschleißart ist jedoch nicht dafür vorgesehen, bestimmte Beanspruchungsvorgänge zu simulieren, denen Gesteine am Bauwerk unterworfen werden. Daß sich nicht jedes Material für eine solche Charakterisierung gleich gut eignet, lassen etwa Versuche an Polymethacrylat erkennen. Hierbei wird das Resultat offensichtlich durch Verformungen der Oberflächenschicht des Werkstoffs beeinträchtigt.

## Prüfverfahren

### Probenvorbereitung

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, für die Prüfung quadratische Probepplatten von etwa 10 cm Kantenlänge und einer Dicke von nicht weniger als 1 cm heranzuziehen. Deren Unterseite muß parallel zur Verschleißebene verlaufen. Die Probekörper werden so hergestellt, daß erkennbare Sedimentationsflächen - wie auch am Bauwerk - senkrecht zur Beanspruchungsfläche orientiert sind. Es ist empfehlenswert, von jedem Gestein wenigstens 3 Proben zu untersuchen, jedoch muß die tatsächliche Anzahl von dessen Homogenität abhängig gemacht werden. Ebenfalls ist der verfahrensspezifischen Anpassung der Verschleißfläche, dem sogenannten Einlaufverschleiß, Rechnung zu tragen. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse läßt sich nur bei gleichartigem Zustand der Proben gewährleisten. In Hinsicht auf eine Trocknung bis zur Massekonstanz muß im Falle der Anwesenheit von wasserhaltigen Salzen, wie z. B. Sulfathydraten, deren Neigung zur Wasserabspaltung berücksichtigt werden.

### Funktionsweise

Abb. 4 zeigt das Schema der Versuchseinrichtung. Mit Hilfe des P.E.I.-Geräts versetzt man die auf seinem Spannteller befestigten Probekörper in eine exzentrische, horizontale Bewegung. Die Kreisscheibe aus einem Sinterwerkstoff

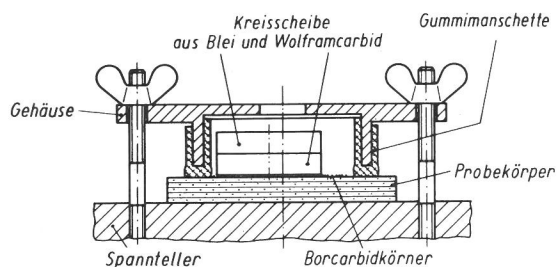


Abb. 4  
Versuchseinrichtung für die Verschleißprüfung (97)

(Wolframcarbid/Cobalt) bewirkt, indem sie auf Schleifmittelkörnern Bewegungen wie in einer Scheibenschwingmühle vollführt, einen fortschreitenden, weitgehend ebenflächigen Verschleiß des Materials. Die möglichst sorgfältig von bröckeligen Partien an ihren Kanten befreiten Probekörper werden auf den Spannteller gesetzt. Auf der zu beanspruchenden, horizontal angeordneten Fläche verteilt man dann 3 g Borcarbid einer Körnung von 0,4 mm. Darauf wird die Kreisscheibe gelegt

und die mit einer ringförmigen Gummidichtung versehene Kapsel am Spannteller befestigt. Schließlich unterwirft man die Vorrichtung der vorgewählten Anzahl von Umdrehungen des Geräteexzenters. Diese ist dem zu untersuchenden (unverwitterten) Material derart anzupassen, daß die lineare Proportionalität der Methode nicht infolge Zerkleinerung der Borcarbidekörner oder deren übermäßiger Verdünnung durch den Abrieb beeinträchtigt wird. Nach jedem Beanspruchungszyklus hat man die Schleifmittelcharge zu entfernen und das Gestein gründlich mit Hilfe eines Druckluftstroms zu reinigen. Im Anschluß daran wird der Dickenverlust z. B. mit einer Meßuhr, in geeigneten Fällen aber neuerdings auch mit einem weniger zeitaufwendigen, neuentwickelten pneumatischen System (134), (135) festgestellt und der Probekörper auf dem Spannteller nach jedem Zyklus um einen rechten Winkel gedreht.

### Darstellung der Ergebnisse

Es empfiehlt sich, die erhaltenen Werte als Dickenverlust pro Umdrehungszahl  $U$  des Geräteexzenters oder aber direkt als Dickenverlust je Beanspruchungszyklus über der Ortskoordinate anzugeben. Zur besseren Orientierung ist parallel dazu eine Bestimmung des Masseverlustes ratsam. Bei der Untersuchung von Profilen unterschiedlicher Gefügefestigkeit kann man für die Darstellung sowohl die Summenkurven als auch den Verlust je Zyklus unmittelbar als Funktion der Umdrehungszahl verwenden. Unterdessen ist das beschriebene Verfahren von der Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions neben anderen zur Erfassung des Verwitterungsprofils an Bausteinen vorgeschlagen und Bestandteil einer RILEM-Empfehlung (171) geworden.

Die für das Probematerial erhaltenen Werte schwanken etwa zwischen 0,3 und  $8,5 \cdot 10^{-5}$  mm/U.

### 2.5 Simulation der Verwitterung

In der Regel wird ein Baustoff durch die atmosphärischen Agenzien in verschiedenen Tiefenlagen unterschiedlich beeinflusst, wobei er ständigen Veränderungen unterliegt. Hier handelt es sich offenbar um Vorgänge, die denen bei der Entstehung von Verwitterungsprofilen an den Begrenzungsflächen geologischer Körper gegen die Atmosphäre vergleichbar sein dürften (vgl. Abschnitt 5 von (145)). Man sollte sich vergegenwärtigen, daß an fast jedem wie auch immer gearteten Verwitterungsprozeß das Wasser in seinen diversen Zustandsformen maßgeblich beteiligt ist (74). Einen Begriff von der Komplexität des Ablaufs gibt eine Arbeit von W. A. M c I n t y r e (137), der klargemacht hat, daß die Widerstandsfähigkeit des Baustoffs gegen Verwitterungseinflüsse vornehmlich von Merkmalen wie thermischer Ausdehnung, Wärmeleitfähigkeit, Porosität, Permeabilität sowie den Parametern der mechanischen Festigkeit bestimmt wird.

Den entsprechenden Simulationsverfahren ist allerdings in gleicher Weise gemeinsam, daß man von ihnen verlangt, sie müßten Ja-Nein-Aussagen wie etwa "bestän-



dig" oder "unbeständig" erbringen. Gerade solchen Forderungen wird eine Dauerwechselbeanspruchung keineswegs gerecht, weil es sich hierbei um die Erfassung progressiver Vorgänge handelt, die sich durch eine willkürliche Grenzziehung nur unzureichend charakterisieren lassen. So kann nach H. S c h n e i d e r (183) bei kombinierter Einwirkung von Feuchtigkeit und Frost auch "nicht zwischen 'dauerfest' und 'nicht dauerfest' unterschieden werden, da die Dauerfestigkeit von der Größe der Beanspruchung abhängig ist". Wesentliche Probleme bei jeder Art von künstlicher Bewitterung bestehen auch darin, daß einige "natürliche" Faktoren wie Schwankungen von relativer Luftfeuchte, Temperatur, Konzentrationen fester, flüssiger und gasförmiger Luftverunreinigungen in der Atmosphäre, Strömungsgeschwindigkeit der umgebenden Luft sowie die durch die geometrischen Verhältnisse und die Oberflächenbeschaffenheit des Werksteins am Bauwerk lokal bedingten Schwankungen von Klima und Gehalt an löslichen Stoffen nicht oder nur ungenügend im Versuchsablauf nachgeahmt werden können (vgl. Abschnitt 6 von (145)).

#### 2.5.1 Frosttauwechselversuch

##### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Zusammen mit anderen Verfahren soll diese Prüfung eine Beurteilungsgrundlage für die Verwitterungsbeständigkeit schaffen. Dabei wird versucht, das durch Gefrieren des Wassers im Porenraum eines Baustoffs infolge Volumenvergrößerung hervorgerufene Sprengen der Porenwandungen labormäßig nachzuahmen. Darauf, daß dies keinesfalls immer gelingt, weist beispielsweise die Änderung des Titels der DIN 52 104 von "Frostbeständigkeit" (50) in "Frostwechselversuch" (51) hin.

##### Anwendungsbereich

Die Aussagekraft des derzeitigen Normverfahrens ist zu Recht bezweifelt worden. Es hat jedoch in zahlreichen Fällen als Bezugsmethode Anwendung gefunden. Die Prüfung wird an Stücken von nicht unbedingt regelmäßiger Begrenzung durchgeführt und kann bei Material ohne nennenswerte offene Porosität (massebezogene Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck  $\leq 0,5 \%$ ) im allgemeinen entfallen.

##### Prüfverfahren

###### Probenvorbereitung

Zur Prüfung dienen mindestens 5 möglichst gleich große Proben (nach der Neufassung der Norm: 150 bis 350 g schwere Stücke, in der Regel von gedrungener Form). Die gut gereinigten Proben müssen frei von losen Teilen sein. Bereits vor Versuchsbeginn augenscheinliche Risse oder Hohlräume werden markiert; die Anordnung von erkennbaren Inhomogenitäten - wie z. B. Sedimentationsflächen - kann beliebig sein.

## Funktionsweise

Außer einem Wärmeschrank für Temperaturen bis wenigstens 120 °C ist ein Kälteschrank erforderlich, der sich innerhalb von etwa 4 Stunden von Raumtemperatur auf mindestens - 15 °C abkühlen und im Anschluß daran 2 Stunden lang konstant halten läßt. Weiterhin werden eine Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,05$  g, ein Exsikkator sowie diverse Schalen oder andersartige Behältnisse benötigt. Nach Ermittlung der Masse der bis zur Konstanz getrockneten Proben erfolgt deren Lagerung in Wasser, wie sie für DIN 52 103 (49) erforderlich ist, d. h. daß sich innerhalb von 24 Stunden ihre Masse um nicht mehr als 0,1 % ändert. Anschließend werden die nach dem Abtupfen mit einem feuchten, ausgedrückten Schwamm gewogenen Stücke "in der Regel 25mal abwechselnd dem Frost ausgesetzt und in Wasser aufgetaut". Während der 2stündigen Haltezeit bei mindestens - 15 °C darf diese Temperatur nicht überschritten werden. Nach jedem Beanspruchungszyklus werden die Proben jeweils in destilliertem Wasser von etwa + 15 °C gefüllten Gefäße mindestens 2 Stunden lang gelagert.

## Darstellung der Ergebnisse und Aspekte ihrer Deutung

Neben der Wägung vor jeder neuen Frostbeanspruchung ist der Stein visuell auf Zerstörungerscheinungen hin zu untersuchen. Bei Versuchsende wird die Masse der "ab- und herausgelösten Teile" nach Abdampfen des Wassers bestimmt. Diese gilt als Ergebnis unter Bezug auf das getrocknete Ausgangsmaterial, oder aber es wird ggf. die Veränderung von dessen Beschaffenheit beschrieben. Neben der Erfassung des Masseverlustes nach jedem Zyklus ist auch das Verhältnis zwischen den an wassergesättigten Probekörpern ermittelten Druckfestigkeitswerten ohne Beanspruchung und im Anschluß an 25 Frosttauwechsel (teilweise nach vorherigem Abgleichen der Flächen der Krafteintragung) zur Beurteilung herangezogen worden. Für die gelegentlich beschriebene Kontrolle des Frostzerrüttungsgrads eines Materials anhand des dynamischen E-Moduls (vgl. z. B. (64)) haben bisher keine entsprechenden apparativen und präparativen Möglichkeiten zur Verfügung gestanden. Anhaltspunkte für die Schwierigkeiten beim Vergleich des Laborversuchs mit den tatsächlichen Verhältnissen am Bauwerk liefert eine Passage in Abschnitt 5.3 von DIN 456 (43), in dem es über Dachziegel heißt: "Für die Beurteilung der Frostbeständigkeit ist das Verhalten der Ziegel auf dem Dach maßgebend". Aufschluß darüber, wie zahlreich und komplex die Vorgänge bei der kombinierten Einwirkung von Feuchtigkeit und Frost tatsächlich sind, geben beispielsweise die von O. C a r l s s o n (37) und H. S c h n e i d e r (183) vorgestellten Resultate. Als kleiner Einblick in solche Fragen kann ebenso der von G. V o s b e r g (205) an Dachziegeln erhaltene Befund nützlich sein, daß bei der genormten Frostprüfung eine niedrige Anzahl von Frosttauwechseln bis zum "Auftreten der ersten Schäden" in phänomenologischer Hinsicht nicht mit späteren Zyklen verglichen werden darf: "Es ist zu berücksichtigen, daß infolge der immer wiederholten Wasserlagerung und der Erweiterung der Öffnungen der Ziegel durch das wiederholte Gefrieren die Porenfüllung stets zunimmt und dementsprechend auch die Sprengkraft des Eises. Eine höhere Frostzahl bedeutet also nicht nur das Überdauern einer größeren Anzahl von Lastwechseln, sondern auch die Aufnahme höherer Belastungen". Aus diesen und zahlreichen anderen Literaturdaten läßt sich schließen, daß bislang noch kein entsprechender Versuch eine sichere Aussage über das voraussichtliche Verhalten eines Materials am Bauwerk gestat-

tet. Konkret wird beispielsweise auch in der belgischen Norm NBN B 05-201 (143) zum Ausdruck gebracht, daß die zur Kontrolle des Frostwiderstands "vorgesehenen Prüfungen bis heute keine vollständig zufriedenstellenden" Lösungen liefern können.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse von Frostprüfung und Kristallisationsversuch (vgl. Abschnitt 2.5.2) mag es indes zunächst zweifelhaft erscheinen, ob der letztere eine geeignete Methode zur Erfassung des Verwitterungsverhaltens darstellt. Dies könnte man etwa damit begründen, daß hierbei die Spannungen nicht auf das Gesteinsinnere übertragen werden, sondern die Anreicherung des sprengenden Salzes vielmehr im Oberflächenbereich der Probekörper erfolgt. Demgegenüber wird ein wassergesättigtes Material unter der Einwirkung von Frost überall dort beansprucht, wo gerade Wasser vorhanden ist, so daß es mitunter zu regelrechten Kernsprüngen kommt. Eben das scheint einen der wesentlichsten Punkte des Problems zu treffen, denn die Resultate der bisher üblichen Frostprüfung gemäß DIN 52 104 (51) lassen sich oft nur schlecht mit dem tatsächlichen Verhalten des Materials in Übereinstimmung bringen. Auf eine solche Unstimmigkeit haben zahlreiche Autoren hingewiesen, obschon diese mitunter irrigerweise durch Vergleich mit den Ergebnissen gerade des genannten Laborversuchs untermauert wird. Im Freien erfolgt nämlich im Zuge kurzzeitiger Regenfälle eine Durchfeuchtung und damit Eisbildung meist nur in der äußeren Schicht des Baustoffs. Eine Schädigung des Gefüges mit nahezu oberflächenparallelen, schalenartigen Ablösungen findet aber nur dann statt, wenn Spannungen zwischen Oberflächenbereich und tiefer gelegenen Material induziert werden. Bei der Normprüfung läuft demnach eine ganz andersartige Materialzerstörung als am Bauwerk ab, so daß sich die Verhältnisse geradezu in ihr Gegenteil zu verkehren scheinen. So können sich die durch Volumenvergrößerung bei der Eisbildung hervorgerufenen Spannungszustände infolge "Gefriertrocknung" von der Oberfläche des Baustoffs weg mehr oder weniger in dessen Inneres verlagern. Der entsprechende Mechanismus dürfte vielleicht auch dadurch eine Bestätigung finden, daß der Dampfdruck über unterkühltem Wasser größer als über Eis ist, weshalb beim Abkühlvorgang - etwa im Porensystem von Zementstein - Feuchtigkeit freigesetzt wird und durch Transport an die Probenoberfläche gelangen soll (126). Schließlich dürften Zweifel darüber angebracht sein, ob - wie verschiedentlich behauptet - die labormäßige Sättigung mit Wasser tatsächlich als Voraussetzung für die "schärfstmögliche" Beanspruchung eines unter Frosteinwirkung stehenden Probematerials gelten kann. Unter Bezugnahme auf Untersuchungsergebnisse an Dachziegeln formuliert H. L e h m a n n (124) entsprechende Bedenken folgendermaßen: "Die Annahme, daß ein völlig mit Wasser getränkter Ziegel, der dem Frost ausgesetzt ist, stärker beansprucht wird als ein Ziegel, der nur etwa zur Hälfte mit Wasser gesättigt und zur anderen Hälfte trocken ist, kann ein Irrtum sein". Der von A. H a m r o l zur Charakterisierung der ohne Mikrorißbildung verwitternden Gesteine vorgeschlagene "Quick Absorption Test" (77) sowie bisherige Beiträge zu einem Neuentwurf von DIN 52 104 scheinen solche Vorgänge ebenfalls zu berücksichtigen.

Bereits nach der Ansicht von W. O l s c h e w s k y ((153), S. 27) schien es "wünschenswerth, mit allen Kräften nach einer Prüfungsmethode zu streben, durch welche mit Sicherheit festgestellt werden kann, ob ein Material frostbeständig ist oder nicht. Angestrebt ist dies Ziel schon seit geraumer Zeit, ohne daß man

bei eingehender Beurteilung der bisher gemachten Vorschläge jedoch sagen könnte, daß eine wirklich brauchbare Bestimmungsmethode genügende Sicherheit bietet." Besonders in neuerer Zeit ist das "Vertrauen zum Frostversuch erschüttert worden" (183), - eine Ansicht, die übrigens seinerzeit schon R. J. S c h a f f e r (180) geäußert hat. So nimmt auch die nahezu niederschmetternde Bemerkung von M. J. S e t z e r (188) nicht wunder, daß "das Problem keineswegs endgültig und befriedigend gelöst" ist, was der Autor nicht nur auf die bisher nur unvollständig geklärten Mechanismen, die zu Frostschäden Anlaß geben, sondern auch darauf zurückführt, daß der Frostangriff "keine genau definierbare Größe" sei.

Es ist hier nicht beabsichtigt, ein umfassendes Bild der Frostprüfung zu zeichnen. Über den neueren Stand der Dinge geben jedoch eine kürzlich zum Thema "Beton" abgehaltene Tagung (202) und eine Darstellung der phänomenologischen Aspekte von G. G. L i t v a n (128) Auskunft.

#### 2.5.2 Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat (mit BAM-Auswertverfahren)

##### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Der Kristallisationsversuch unter Verwendung von Natriumsulfat ist von B r a r d (88) bereits im Jahre 1828 eingeführt worden und dient seither als einfache Prüfmethode zur Vorausbeurteilung der Verwitterungsbeständigkeit von Baustoffen, und zwar vor allem Natursteinen. Hierbei werden Probekörper abwechselnd mit einer Natriumsulfatlösung getränkt und unter Erwärmung getrocknet. Nach R. J. S c h a f f e r (179) besteht der Vorteil dieses Verfahrens insbesondere darin, daß verschiedenartige, nicht ohne weiteres interpretierbare Parameter, wie z. B. Größe und Verteilung der Poren oder mechanische Festigkeit des Materials, im Versuchsergebnis ihren Niederschlag finden. Die an der Baustoffprobe hervorgerufenen Zerstörungsvorgänge sind in erster Linie mit dem im Porenraum ausgeschiedenen Natriumsulfat und der Volumenvergrößerung seiner wasserfreien Varietät durch Hydratation zu Dekahydrat in Zusammenhang zu bringen. In der Regel bedarf es einer mehrfach wiederholten Tränkung und Trocknung zur erforderlichen Anreicherung des Salzes, damit der infolge der erwähnten Reaktion stattfindende relative Volumenanstieg auf etwa das 4fache eine schädigende Wirkung auf die Porenwandungen des Materials ausüben kann. Die Möglichkeit einer solchen Zerstörungsursache ist in den 30er Jahren von Mitarbeitern der BRS (siehe (161)) u. a. dadurch bestätigt worden, daß sich mit Annäherung der Lösungstemperatur an den Punkt der Phasenumwandlung  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{SO}_4$  die sprengende Wirkung offensichtlich verringert, bis sie schließlich ganz aufhört. Grundsätzlich können nach G. T o r r a c a (200) für die Zerstörung eines porösen Materials infolge Kristallisationssprengung durch lösliche Salze indes verschiedene Mechanismen in Betracht kommen:

- Kristallisation in groben Poren und auf Rissen bei Lösungsnachschub aus den kleinen Poren;
- Entwässerung des Hydrats, wobei die Summe des wasserfreien Äquivalents + Wasser ein größeres Volumen als jenes einnimmt, sowie
- Hydratation der wasserärmeren bzw. wasserfreien Phase.

Welches dieser Modelle im einzelnen auch immer relevant sein mag, letztlich verläuft die Wirkung eines jeden solchen Mechanismus gleichsinnig. Zu Vergleichszwecken sind bei den vorliegenden Untersuchungen drei verschiedene experimentelle Varianten der Methode herangezogen worden, deren Ergebnisse jeweils deutliche Unterschiede im Verlauf der Masseänderung aufweisen. Es sind dies: Die in der zum Building Research Establishment gehörigen Building Research Station BRS, Garston/Britannien, gebräuchlichen Tests A und B (32), (160), sowie die Prozedur nach DIN 52 111 (56).

### Anwendungsbereich

Nach seinem Erfinder (vgl. (88)) soll das Verfahren vor allem dazu in der Lage sein, den Angriff von Baustoffen durch die kombinierte Einwirkung von Feuchtigkeit und Frost zu simulieren. Es ist allerdings denkbar, daß die erhaltenen Daten weit universeller, d. h. ebenso auf andere Verwitterungsarten anwendbar sind, wenngleich "bisher keine eindeutige Übereinstimmung zwischen dem Verhalten der Gesteine bei Beanspruchung durch den Kristallisationsversuch" und dem Frostversuch besteht (56). Über die Frage, welcher am Bauwerk auftretende Einflußfaktor mit dem Kristallisationsversuch am besten erfaßt werden kann, besteht allgemein Uneinigkeit (vgl. (6)). So bezweifeln auch D. W. K e s s l e r und W. H. S l i g h (111), daß diese Prüfung überhaupt eine geeignete Methode zur Erfassung des Verwitterungsgeschehens darstellt, was sie damit begründen, daß die Spannungen nicht auf das Gesteinsinnere übertragen werden (vgl. Abschnitt 2.5.1). Aus Illinois wird demgegenüber von einer zufriedenstellenden Eignung des Kristallisationsversuchs gemäß ASTM C 88 (11a) als Kriterium für das Frostverhalten von gebrochenem Kalkstein und Dolomit als Betonzuschlag berichtet (82a).

Offenbar kann das Verfahren jedoch grundsätzlich für die Untersuchung von Gesteinsproben angewandt werden, bei denen die Gefügekörner und die Poren im Verhältnis zu den Probekörperdimensionen relativ klein sind. Weitere Voraussetzungen sind, daß das Probematerial bei Einlagerung in Natriumsulfatlösung keine wesentliche chemische Veränderung erfährt (vgl. (111)), näherungsweise homogen ist, eine nennenswerte Porosität aufweist und in Hinblick auf die spätere Auswertung nach Möglichkeit Material herangezogen wird, bei dem die Zerstörung der würfelförmigen Probekörper durch Abtrag in der Reihenfolge: Ecken, Kanten, Flächen derart vor sich geht, daß letztlich eine kugelähnliche Gestalt erreicht wird (vgl. (39), (144)). Einschränkend hierzu ist indessen eine Bemerkung von R. J. S c h a f f e r (180) zu verstehen, der den Versuch dann für weniger aussagekräftig hält, wenn seine Resultate nicht in Verbindung mit "anderen Eigenschaften wie Festigkeit, Elastizität, Porosität und Wasseraufnahme" verwendet werden.

### Prüfverfahren

#### Probenvorbereitung

Es hat sich für die visuelle Kontrolle des Absandungsvorgangs als zweckmäßig erwiesen, je Material wenigstens 6 würfelförmige Probekörper einer Kantenlänge von 5 cm zu verwenden (tatsächlich sind für die drei Versuchsvarianten meist jeweils



nur drei herangezogen worden). Dabei sollen erkennbare s-Flächen möglichst parallel zu einer Würfel­fläche orientiert sein. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse kann nur bei gleichartigem Zustand der Proben gewährleistet werden, was in der Regel durch vorheriges Trocknen bis zur Massekonstanz erfolgt.

#### Funktionsweise

Für den Versuch sind ein Wärmeschrank mit Zwangsentlüftung für Temperaturen bis mindestens 120 °C, mit einer Aufheizgeschwindigkeit von rund 0,1 K·min<sup>-1</sup>, eine Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  g, Gefäße für die Lagerung der Probekörper in der Salzlösung, ein Behälter mit Trockenmittel zur Zwischenlagerung des getrockneten Materials, eine Porzellanschale zur Verdampfung einer definierten Wassermenge im Wärmeschrank sowie chemisch reines Natriumsulfat zur Herstellung der Prüflösung erforderlich.

Die drei in das Versuchsprogramm einbezogenen Methoden unterscheiden sich in folgender Weise:

Während die beiden vom britischen Forschungsinstitut Building Research Station BRS angewendeten Verfahren A und B (32) dadurch gekennzeichnet sind, daß man die Proben nach Lagerung in 14%iger bzw. gesättigter (etwa 44%iger) Natriumsulfat-Dekahydrat-Lösung bei 100 % relativer Feuchte allmählich bis zum Erreichen der vorgeschriebenen Temperatur von  $103 \pm 2$  °C erwärmt, wird das Material nach DIN 52 111 unmittelbar in den auf 105 bis 110 °C vorerhitzten Wärmeschrank eingebracht.

Im Falle der beiden BRS-Tests A und B wird während des etwa 15 Stunden dauernden, gleichmäßigen Aufheizens (annähernd 1 K · min<sup>-1</sup>) bis zur Endtemperatur (Gesamtdauer der Wärmebehandlung 16 h) kontinuierlich Wasser verdampft, um im Frühstadium der Trocknung eine hohe relative Luftfeuchte aufrechtzuerhalten und dadurch die "Verdunstungsfront" erst nach Erreichen höherer Temperaturen in das Steininnere zu verlagern. Demgegenüber erfolgt das Trocknen gemäß DIN innerhalb von 6 bis 7 h von vornherein bei maximaler Wärme. Die Probekörper werden danach in einem mit Trockenmittel bestückten Gefäß solange sich selbst überlassen, bis sie die zwischen 20 und 25 °C konstant gehaltene Temperatur erreicht haben. Der durch Wägung ermittelte Masseverlust besteht aus dem abgesandeten Material sowie der "durch leichten Druck mit den Fingern zu lockernden Masse" (55). Nach der Wägung werden bei den BRS-Varianten die Proben erneut in die Prüflösung eingebracht und dort 2 Stunden bei voller Bedeckung belassen. Demgegenüber fordert der DIN-Versuch nach zunächst nur einstündigem Eintauchen bis zur halben Höhe des Probekörpers anschließend ein Verbleiben von 16 bis 17 Stunden in der Lösung. Dann werden die Proben herausgenommen und nach kurzem Abtropfen erneut der vorgeschriebenen Wärmebehandlung zugeführt. Um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse sicherzustellen, muß die Flüssigkeit gelegentlich erneuert werden. Dies gilt vor allem für die 14%ige, beim BRS-Test A verwendete Lösung.

#### Darstellung der Ergebnisse und Aspekte ihrer Deutung

Im Gegensatz zu den bisher geübten Versuchspraktiken, die einen zufälligen Zustand der Zerstörung (z. B. die Masse nach 10 bzw. 15 Beanspruchungszyklen oder aber die Zyklenanzahl, nach dem die Probekörper einen bestimmten Masseverlust



erlitten haben) aus dem Zusammenhang herausgegriffen haben, ist es das Ziel eigener Bemühungen gewesen, eine besser quantifizierbare Aussage über den Verlauf des Absandungs- bzw. Abschälungsvorgangs an gleichmäßig verwitterndem Material zu gewinnen. Obwohl man bei der Beurteilung des Versuchsergebnisses ohne eine sorgfältige Beobachtung des Typs der Zerstörung nicht auskommt, soll den von stufenweiser Salzanreicherung und Zerfall geprägten, "nützlichen" Kurven der Masseänderung (179) dennoch ein besonderes Augenmerk gewidmet werden.

Sofern Daten in ausreichender Menge vorhanden sind, läßt sich der infolge schichtenweiser Abtragung im Oberflächenbereich der Probekörper auftretende Masseverlust mit Hilfe der zur Beschreibung von Lebensdauerphänomenen gebräuchlichen WEIBULL-Verteilung darstellen (6). Die hierfür speziell herangezogene Fassung der entsprechenden Beziehung lautet:

$$y = (100 + y_0) \cdot e^{-\left(\frac{x - x_0}{p_1 - x_0}\right)^{p_2}} - 100.$$

Hierin ist die aufsummierte, prozentuale Massezunahme  $y$  der Anzahl der Beanspruchungszyklen  $x$  gegenübergestellt.  $y_0$  sorgt für den rechnerischen Ausgleich der anfänglichen Massezunahme infolge der  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Ausscheidung innerhalb des Porenraums der Probe, d. h. der Schnittpunkt der Kurve mit der Ordinate entspricht etwa der Massezunahme, die ein an Sulfat "gesättigter" Probekörper erreichen kann.  $x_0$  steht für die Anzahl der vor Beginn des Absandens durchlaufenen Beanspruchungszyklen. Die für die verschiedenen Varianten des Kristallisationsversuchs unterschiedliche Dauer des Zerstörungsprozesses drückt sich in der Veränderung von  $p_1$  der WEIBULL-Beziehung aus. Diese Größe ist als ein material- und verfahrensspezifischer Parameter anzusehen, der die Lage eines ausgezeichneten Punktes angibt, wo  $p_1 = x$  ist, und der damit einen Maßstabsfaktor für die Kurve darstellt. Demgegenüber ist der Formparameter  $p_2$  offenbar überwiegend materialspezifisch und charakterisiert, wenn er niedrige Werte annimmt, einen früh beginnenden allmählich verlaufenden Absandungsvorgang, bei hohen Werten dagegen eine längere Anlaufzeit mit abruptem Einsetzen der Zerstörung.

Auf der Suche nach Anhaltspunkten für den "allgemeinen Ansatz" des Verwitterungsverhaltens erhebt sich - wie bereits in der Einleitung angedeutet - sofort die Frage nach der Rangfolge der Eignung der vorgesehenen Parameter. Falls man hierfür als Maßstab die Anzahl der möglichen Vergleiche mit anderen Merkmalen anerkennt, schneidet neben einigen solchen für Porosität und kapillare Wasseraufnahme (vgl. Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2) der für die neuartige Auswertung des Kristallisationsversuchs herangezogene Faktor  $p_1$  (vgl. (6)) verhältnismäßig gut ab. Gleichfalls kann man ihn mit dem bisher für die Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit von Werksteinen als halbwegs zuverlässig angesehenen S-Wert (vgl. Abschnitt 2.3.1) in Beziehung bringen. Dennoch muß man sich immer darüber im klaren sein, daß ein absoluter Maßstab fehlt und hier (vielleicht ungerechtfertigt!) Anzahl und Qualität - also möglichst viele verschiedene Korrelationen bei geringer Streuung der Meßwerte um den mittleren Kurvenlauf - für eine Aussage bestimmend sind. Erste Beobachtungen legen die Überlegung nahe, daß man den Zerstörungsverlauf des Probekörpers mit Hilfe der WEIBULL-Beziehung auch unabhängig von seiner Gestalt beschreiben kann, wobei allerdings die Parameter der Funktion dementsprechend beeinflußt werden. Die vorgestellte Auswertmethode

erreicht ihre Grenzen, wenn die Probewürfel aufgrund von gefügebedingten Besonderheiten nicht in kugelähnliche Restkörper übergehen.

Es ist nicht beabsichtigt, wieder einmal eine neue "naturnahe" und "universelle" Variante des Kristallisationsversuchs zu schaffen bzw. ihre Existenzberechtigung zu diskutieren, sondern vielmehr angezeigt, eine gemeinsame Klammer für die bisher gebräuchlichen Verfahrenstypen zu finden. Vorerst muß auch die Frage offenbleiben, inwieweit hierdurch wenigstens Teilaspekte der Beanspruchung eines Baustoffs durch Frost, aufsteigende Salzlösungen oder Sulfatverwitterung als Folge der Einwirkung schwefeloxidhaltiger Atmosphäre nachgeahmt werden können. Eine sinngemäße Übertragung des von E. S c h a e f e r (178) beschriebenen Gütefaktors  $Q$ , der sich beim Erkennen der Frühausfälle im Falle von Werkstoffermüdung zur "Interpretation" der WEIBULL-Verteilung bewährt haben soll, ist versucht worden. Hinsichtlich seiner Korrelation mit anderen Kennwerten - hier entsprechend dem Quotienten  $p_1/p_2$  - läßt er jedoch gegenüber dem einfachen Gebrauch des Maßstabsfaktors  $p_1$  fast ausschließlich Nachteile erkennen, so daß von seiner Verwendung derzeit abgesehen wird. Obgleich mit Hilfe von  $p_1$  noch keinesfalls etwas über die Dauerhaftigkeit von Gesteinen im allgemeinen ausgesagt werden kann, so ist mit dieser Art der Auswertung doch ein wesentlicher Schritt in Richtung auf einen jener Parameter getan worden, die es ermöglichen, durch Vergleich mit anderen Kennwerten das Materialverhalten einzuschätzen. Die Schwierigkeiten, die in diesem Zusammenhang eine absolute Bewertung sowie die Herstellung eines Bezugs zu anderen Merkmalen mit sich bringt, hat B. B u t t e r w o r t h (36) u. a. für die Freibewitterung von zur Hälfte im Erdreich eingegrabenen Mauerziegeln aufgezeigt. Dieses Verfahren ist später in ähnlicher Weise von D. B. H o n e y b o r n e und P. B. H a r r i s (99) sowie von C. A m m a r und R. G é r a r d (4) aufgegriffen worden.

Die Größe von  $p_1$  liegt - alle drei Testvarianten zusammengenommen - für die untersuchten Gesteine, deren Zerfall nicht gerade allzulange gedauert hat, in einem Intervall zwischen ungefähr 3 und 120 Zyklen (die Werte für den Formfaktor  $p_2$  betragen zwischen etwa 0,7 und 12).

### 2.5.3 Bewitterung in $SO_2$ -Atmosphäre bei wechselnder Luftfeuchte (BAM-Verfahren)

#### Grundlage und Ziel des Verfahrens

Die Methode zur Simulation der Alterung von Baustoffen unter Einwirkung schwefeloxidhaltiger Atmosphäre geht im Prinzip von dem in DIN 50 018 genormten Gerät nach W. K e s t e r n i c h (112) aus. Es haben sich für den vorgesehenen Zweck indessen grundlegende Änderungen des entsprechenden Verfahrens als unerläßlich erwiesen. So ist vor allem unbefriedigend gewesen, daß über mehrere Stunden gleichbleibend eine relative Luftfeuchte von 100 % mit Hilfe eines auf 40 °C erhitzten Wasserbads aufrechterhalten und bei jedem Bewitterungszyklus ein verhältnismäßig hoher  $SO_2$ -Anteil eingebracht wird. Das hat zur Folge, daß das Gestein anfangs einer sehr hohen Gaskonzentration ausgesetzt ist, die erst allmählich abnimmt. Der im Gegensatz dazu bei Raumtemperatur ausgeführte Versuch

mit kontinuierlichem Durchfluß eines SO<sub>2</sub>-Luft-Gemisches und nur kurzzeitiger Befeuchtung scheint den "natürlichen" Vorgängen weit eher Rechnung zu tragen. Eine solche Prozedur hat den Vorteil, daß der SO<sub>2</sub>-Partialdruck annähernd konstant gehalten werden kann, was besonders bei einem Vergleich von Baustoffen mit unterschiedlichem Aufnahmevermögen für dieses Gas interessant ist (vgl. u. a. (67)).

### Anwendungsbereich

Diese Laboruntersuchung wird vorzugsweise an Materialien mit nennenswertem Kalkgehalt vorgenommen. Auch dabei ist eine Übertragung der erzielten Resultate auf die tatsächlichen Verhältnisse am Bauwerk problematisch, zumal zahlreiche in der Natur auftretende Parameter nicht berücksichtigt werden können. Im Gegensatz zu den vorbeschriebenen physikalischen Beanspruchungen wird hier ein chemischer Angriff simuliert. Die dabei ablaufenden Vorgänge lassen sich nur begrenzt beschleunigen, wenn man die Reaktionsmechanismen nicht "denaturieren" will. Der wesentliche Nachteil der Methode besteht aber darin, daß etwa die Frosteinwirkung vernachlässigt werden muß. Hinsichtlich der Einsatzfähigkeit des Verfahrens kann auch die von A. K i e s l i n g e r (113) zu den frühen Laborbewitterungsversuchen von H. S e i p p (187) ausgesprochene Warnung gelten: "Die künstlichen Verwitterungsversuche, die 'abgekürzten Wetterbeständigkeitsproben', müssen den Zeitfaktor durch Verstärkung anderer Teilumstände ersetzen. Dadurch wird aber vielfach das ganze Bild gefälscht". Dies gilt selbstverständlich in ähnlichem Maße für die Einschätzung der anderen in Abschnitt 2.5 behandelten Simulationsmethoden.

### Untersuchungsverfahren

#### Probenvorbereitung

Bei den Versuchen ist auch auf die materialbedingten Vorzugsrichtungen in den Probekörpern zu achten. Dabei sollte eine Ausrichtung vermieden werden, die einem fehlerhaften handwerklichen Einbau entspricht. Aus diesem Grund werden z. B. Sandsteine so geschnitten, daß die zu bewitternde Fläche senkrecht auf den erkennbaren Schichtflächen steht, was also einer lagergerechten Orientierung im Bauwerk gleichkommt. Bei Gesteinen mit hoher offener Porosität ist damit zu rechnen, daß die Front der chemischen und physikalischen Veränderungen tief in die Oberflächenebene des Materials eindringt. Um eine eventuelle Überlappung der entstehenden Konzentrationsprofile zu vermeiden, empfiehlt sich daher ggf. eine Abdichtung der hier verwendeten Probplatten auf den übrigen fünf Seiten.

In einigen Fällen ist eine besondere Präparation erforderlich: Da das Forschungsvorhaben die Untersuchung der Verwitterung von kalkhaltigen Gesteinen zum Ziele hat, scheint es zunächst abwegig, Sandsteine ohne nennenswerte Anteile an carbonatischem Bindemittel in das Versuchsprogramm einzubeziehen. Es ist indessen bekannt, daß auch von Natur aus nichtcarbonatisch gebundene Sandsteine unter dem Einfluß schwefeloxidhaltiger Atmosphäre eine Schädigung erleiden können, die mit der Entstehung von Calciumsulfatdihydrat zusammenhängt. Der hierfür erforderliche Kalk kann beispielsweise aus Mauer- oder Putzmörteln (121), Kalkanstrichen (95) sowie benachbarten kalkhaltigen Bausteinen (32) stammen, aber auch von

Staubablagerungen (105), (140) und von durch Bakterien aufbereiteten Vogelexkrementen (140) herrühren, wobei das Gestein durch Transport auf dem Lösungswege mit Kalk bzw. Magnesia oder auch unmittelbar mit Calciumsulfat angereichert wird.

Zur Nachahmung derartiger Vorgänge ist es zweckmäßig, dem zugänglichen Porenraum von kalkarmen oder kalkfreien Sandsteinen vor dem Bewitterungsversuch ggf. entsprechende Kalkmengen zuzuführen. Bei flüchtiger Betrachtung könnte ein solches Vorgehen als ein schlecht kontrollierbarer Eingriff in das Porengefüge verstanden werden. Andererseits ist für eine Sulfatschädigung der beschriebenen Art eine kalkliefernde Komponente unerlässlich und im betreffenden Baustein ja auch nachweisbar. Im Zuge einer derartigen Manipulation dürfte allerdings der Baustoff nicht unnötig verändert werden. Außerdem sollten definierte Verhältnisse bei der Präparation geschaffen werden. Unter diesen Gesichtspunkten sind Gesteine mit einem Masseanteil von  $< 1\%$   $\text{CaCO}_3$  entsprechend vorbehandelt worden. Das geschieht auf folgende Weise: Man taucht die getrockneten Probekörper einige Millimeter tief in eine nahezu konzentrierte Calciumacetat-Lösung ein. Dies wird solange wiederholt, bis etwa das 3-fache der Zeit verstrichen ist, die für das Vordringen der Lösungsfront bis zur Probenoberfläche benötigt. Anschließend trocknet man das Material bei etwa  $105\text{ }^\circ\text{C}$  und 10 mbar Restdruck bis zur Massekonstanz und überführt es in einen Exsikkator mit Trockenmittel. Ebenso wie bei der Acetat-Tränkung wird nun mit einer nahezu gesättigten Ammoniumcarbonatlösung verfahren, die man zweckmäßigerweise aus Ammoniumcarbaminat herstellt. Jedoch taucht man die Probekörper hierbei umgekehrt in die Lösung, um einen gegenläufigen Lösungstransport zu erzwingen. Eine völlig gleichmäßige Verteilung des neu gebildeten Calciumcarbonats kann allerdings auf diesem Wege nicht erzielt werden. Wie schwierig es ist, eine halbwegs homogene räumliche Verteilung von Fremdstoffen zu bewerkstelligen, geht z. B. auch aus Färbeversuchen an Sandsteinen hervor (73).

#### Funktionsweise

Bei der vorliegenden Methode wird eine konstant den Versuchsraum durchströmende  $\text{SO}_2$ -Menge von  $(15 \pm 3)$  ppm  $\text{SO}_2$  verwendet - in erster Näherung entsprechend dem 100fachen Wert des auf dem Gelände der Bundesanstalt gemessenen Jahresdurchschnitts (182). Da eine Wirkung des Schwefeldioxids auf trockenes Material allenfalls geringfügig (176) ist, muß das für die Reaktion erforderliche Wasser den Proben erst angeboten werden. Es liegen bis jetzt noch keine gesicherten Aussagen über die offenbar materialspezifischen Feuchtigkeitsgehalte vor, bei denen der Umwandlungsmechanismus optimal abläuft. Deshalb wird das Gestein während eines Bewitterungszyklus jeweils kontinuierlich einen weiten Bereich zwischen 50 und 100 % relativer Luftfeuchte ausgesetzt.

Innerhalb des Prüfraums bedingt die kurzzeitige Verdampfung zunächst eine Sättigung bis zu 100 %, wobei das Wasser teilweise auf der Baustoffoberfläche kondensiert. Infolgedessen erhöht sich die Temperatur zeitweilig um etwa 4 K. Der für die Dosierung des  $\text{SO}_2$  als Träger verwendete trockene Luftstrom bewirkt anschließend eine stetige Abnahme der Feuchte bis auf etwa 50 %. Nach einem bestimmten Zeitintervall - im vorliegenden Fall 8 h - wird durch Schalten eines Relais dann

erneut eine kurzzeitige Wasserverdampfung ausgelöst. Ihr Verlauf und die weiteren Funktionen der Bewitterungseinrichtung sind aus Abb. 5 ersichtlich. Die Bewegung der Proben innerhalb des Prüfraums mit Hilfe eines Drehgestells gewährleistet vor allem, daß diese dem periodisch erzeugten Wasserdampf gleichmäßig ausgesetzt sind, während ein Ventilator das  $\text{SO}_2$ -Luft-Gemisch ständig verwirbelt. Mit Hilfe eines Heißleiter-Psychrometers und eines Thermoelements werden relative Luftfeuchte und Temperatur fortlaufend überwacht.

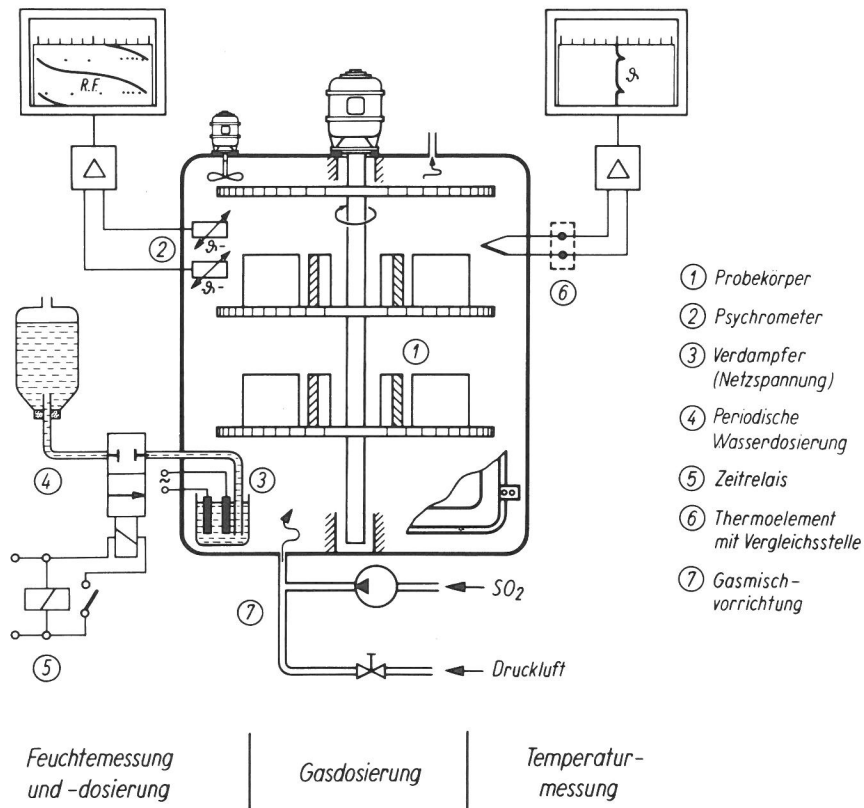


Abb. 5  
 Schema der in der Bundesanstalt entwickelten Bewitterungseinrichtung für  $\text{SO}_2$ -Atmosphäre und wechselnde Luftfeuchte (150)

### Darstellung der Ergebnisse und Aspekte ihrer Deutung

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung eines "Bewitterungsergebnisses". Naturgemäß wird sich hier eine Kontrolle der Eindringtiefe des Schwefelanteils anbieten, die man z. B. mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenanalyse im Rasterelektronenmikroskop (vgl. Abschnitt 2.2.2) erreichen kann. Mitunter lassen sich aber auch die Gasdurchlässigkeit (vgl. Abschnitt 2.3.4) oder das mit Hilfe eines Oberflächenverschleißverfahrens (vgl. Abschnitt 2.4.4) charakterisierte "mechanische Verwitterungsprofil" heranziehen. Trotz der relativ geringen kontinuierlichen  $\text{SO}_2$ -Zufuhr, die von einer zyklischen Wasserdampfkondensation auf dem Probematerial überlagert wird, ist nicht zu verhindern, daß in den Oberflächenschichten neben Sulfaten zunächst Sulfite entstehen. Die hier maßgeblichen, von Material und Versuchsanordnung abhängigen Reaktionsbedingungen sind noch nicht hinreichend bekannt. Es kann nur soviel gesagt werden, daß z. B. kompakte Kalkgesteine mit verhältnismäßig niedriger spezifischer Oberfläche und geringen Verunreinigungen bei dieser Bewitterungsart im Gegensatz zu ihrer ent-



sprechenden "natürlichen" Beanspruchung überhöhte Sulfit/Sulfat-Verhältnisse aufweisen.

Was aber sollte man denn unter Zerstörung durch  $\text{SO}_2$ -Angriff nun eigentlich verstehen? Bedeutet sie etwa das Absanden bzw. Abbröckeln der Oberflächenschicht eines Sandsteins als Folge der Schwächung von dessen kalkhaltigem Bindemittel nach der Umsetzung in Sulfat, wie sie u. a. auch bei Außenputzmörtel (149) eine Rolle spielt? Oder ist sie gleichzusetzen mit der in Kalkmörteln gelegentlich anzutreffenden Verfestigung dieser Zone durch Ausfüllung des Porenraums mit Gips, die sich schließlich irgendwann schichtig ablösen kann, wenn auch nicht unbedingt muß? Es steht außer Frage, daß für solche verschiedenartige Verhaltensmuster mehr als nur ein Faktor verantwortlich ist, so daß letztlich Zweifel an der vollkommenen Erfassbarkeit der Phänomene am Bauwerk anhand eines Simulationsverfahrens erlaubt sein dürften. Die verschiedenen Beanspruchungsarten lassen sich im Einzelfall also meist nicht einmal deutlich voneinander trennen, und man muß auch mit ihrer gegenseitigen Beeinflussung rechnen, wie Bemerkungen von W. A. M c I n t y r e (137) unterstreichen. Dieser bringt zum Ausdruck, daß durch die jeweiligen Verwitterungsmedien verursachten Schäden möglicherweise "einzeln genommen zu gering sind, um Bedeutung zu erlangen, aber der kumulative Effekt von zwei oder mehr in Kombination wirkenden Faktoren, besonders wenn durch Schwachstellen infolge fehlerhaften Gefüges begünstigt", zu merklicher Zerstörung Anlaß geben kann. Diese Problematik klingt auch bereits bei A. S e i p p ((186), S. 183-184) in bezug auf die Eignung von Simulationsverfahren an: "Die Kenntnis der Wasseraufnahmefähigkeit einer Steinsorte gestattet nur b e s c h r ä n k t e und b e d i n g t e Schlüsse auf ihr Verhalten im Frost". Noch wichtiger scheint aber der Hinweis des Autors, daß auch eine Kombination von Frost- und Bewitterungsprüfung keinesfalls eine vollständige Bewertung der Verwitterbarkeit eines Baustoffes ermöglicht, "weil es sich bei ihr der Beurteilung verbirgt, inwieweit die am Probekörper eintretenden Veränderungen auf Rechnung der Frost-, inwieweit auf Rechnung der Agentienwirkung zu setzen sind". Dieser Gedankengang hat auch aus heutiger Sicht noch nichts von seiner Gültigkeit verloren. Daraus ergeben sich wiederum besondere Probleme für jegliche Art Simulation.

Auskunft darüber, wie kompliziert die Verhältnisse im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit der Ablagerung von Schwefelverbindungen und der mechanischen Festigkeit der Oberflächenschicht bei "natürlicher" und künstlicher Beanspruchung von Baustoffen mit Hilfe des beschriebenen Verfahrens tatsächlich sind, gibt beispielsweise eine Arbeit von D. H o f f m a n n über Kalkmörtel (96). Es liegen jedoch noch keine ausreichenden Erfahrungen vor, so daß für eine Erprobung weitere Anstrengungen erforderlich sind. Zusätzliche Schwierigkeiten kommen daher, daß im Gerät weder die am Bauwerk auftretende Frosteinwirkung noch die Auslaugungsvorgänge infolge Regenfall nachgeahmt werden können. Vor allem aber muß man die Möglichkeiten der quantitativen Erfassung des Bewitterungsfortschritts noch genauer prüfen.



### 3. Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 Aspekte bei Auswertung und Darstellung

Es bietet sich an, die verschiedenen Merkmalskombinationen grafisch darzustellen. Die Zuordnung einer Punktfolge wird dabei häufig durch Streuung erschwert (vgl. (148)). In solchen Fällen empfiehlt es sich, erst einmal die Meßgenauigkeit des Verfahrens zu überprüfen. Als untauglich sind so einzelne Ergebnisse für Sättigungswert und kapillare Wasseraufnahme erkannt und eliminiert worden, weil das entsprechende Material deren exakte Bestimmung wegen eines zu geringen Anteils an offener Porosität nicht zugelassen hat. Das gleiche gilt für den zur Beschreibung des Kristallisationsversuchs herangezogenen Maßstabsparameter  $p_1$  (vgl. Abschnitt 2.5.2), der z. B. wegen zu geringer Versuchsdauer oder infolge anomaler Formänderung der Probekörper manchmal nur ungenau zu ermitteln ist. Schwer feststellen lassen sich Abhängigkeiten vor allem dann, wenn mehrere "Störfaktoren" aufeinander treffen. Beispielhaft hierfür sind Funktionen zwischen dem S-Wert und der Porengrößenverteilung, wobei diese ihrerseits merklich durch hochdisperse Gefügekomponenten beeinflusst werden können.

Die behandelte Frage ist vor allem deshalb schwierig, weil bisher kaum etwas Verbindliches über die "Rangfolge" jedes einzelnen Kennwerts hinsichtlich seines Beitrags zur Lösung des "allgemeinen Ansatzes" für das Verwitterungsverhalten vorliegt. So kann die offene Porosität zwar "noch nicht einmal als Indikator für die Wasserdurchlässigkeit eines Bausteins dienen" (160) und sich daher auch nicht als selbständiger Parameter eignen, obwohl sie in Verbindung mit dem S-Wert ein zuverlässiges Maß liefern soll (34). Dessen Aussagekraft ist allerdings geringer als die der Ergebnisse des Kristallisationsversuchs anzusehen, was eigene Erfahrungen bestätigen. Wie leicht man aber eine Korrelation verkennen kann, beweist etwa die "Aufspaltung" einiger Meßwerte für Kalksteine und Sandsteine, die augenscheinlich nur eine Punktwolke ergeben. Sofern aber erst einmal das richtige Klassifikationsmuster gefunden worden ist, stellt diese sich letztlich doch als signifikant heraus. Als weiteres Beispiel dafür, wie eine unfreiwillige Fehldeutung den Wert einer Aussage beeinträchtigen bzw. eine vorhandene Tendenz verschleiern kann, mag die unterschiedliche Beschaffenheit des Kornzements bzw. der Zwickelfüllungen bei klastischen Sedimentgesteinen dienen. Wenn etwa an den Grenzen der Gefügekörner befindlicher Feldspat der Kaolinisierung bzw. Sericitisierung unterworfen oder aber ein anderes, dort vorhandenes Bindemittel durch Auflösung geschwächt worden ist, hält ein solches Material trotz vergleichbaren Porengefüges hinsichtlich seiner Festigkeit - sprich: Kornbindung - einfach nicht mehr mit. In gleichem Sinne haben derartige, nicht selten hochdisperse Neubildungen oder Relikte ein intensives Eindringen von Feuchtigkeit zur Folge, d. h., daß auch der bereits von anderen Baustoffen bekannte Effekt einer "Erweichung" bei Feuchtigkeitsaufnahme in verstärktem Maße eintritt. Natürlich sind solche Vorgänge, abgesehen von der jeweiligen Zusammensetzung, vor allem eine Frage der räumlichen Anordnung der Gefügebestandteile. Nach N. S t r e e t und F u n - D e n - W a n g (195) kann im Falle von Sandstein eine derartige Festigkeitsminderung offenbar durch den Einfluß von Tonmineralen oder von kolloiddispersen Systemen wie etwa nach Fällung von Eisenoxidhydrat begründet werden. Die Autoren bezeichnen dieses Phänomen als pH-

abhängig und führen es auf die Herabsetzung der Oberflächenenergie - einen Kontakt mit der umgebenden Lösung vorausgesetzt - im Zusammenhang mit dem Oberflächenpotential zurück. Möglicherweise liegt hier sogar der Schlüssel für die Erklärung des abweichenden Verhaltens. Auch K. H o s h i n o (100) hat im Zuge von triaxialen Druckversuchen an klastischen Sedimenten darauf hingewiesen, daß besonders Tuff- und Tonmineralanteile für unerwünschte Meßwertstreuungen in der Beziehung zwischen Druckfestigkeit und Porosität verantwortlich sind.

Man sollte sich einmal klar machen, worin vermutlich die Ursache für zahlreiche Fehlschläge beim Bemühen um eine Korrelation von unterschiedlichen Kennwerten zu suchen ist. Jedenfalls muß vor der verbreiteten Ansicht gewarnt werden, daß die Vorbedingung für den gesicherten Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen deren universelle Anwendbarkeit sei. Da man meist sowieso nicht über ein allzu umfangreiches Meßwertkollektiv verfügt, bietet sich in der Regel kein anderer Weg als die Aussonderung vor allem solcher Daten an, die wegen eines offenbar zusätzlich wirksamen Einflusses einem bi- oder gar multivariatem System zuzurechnen wären. Man könnte zwar einwenden, eine derart drastische Maßnahme würde dazu ermutigen, alle Punkte außerhalb des Streubereichs einer "erhofften Abhängigkeit" ganz willkürlich zu eliminieren. Deren Anzahl wäre aber wiederum meist zu gering, als daß man irgendwelche Hinweise auf eine Systematik ihrer Abweichung vom "Normalverhalten" erzielen könnte. Es ist jedoch ein einigermaßen sicheres Mittel gefunden worden, Materialien mit einer sogenannten gestörten Kornbindung kenntlich zu machen (vgl. später in Abschnitt 3.2.3). Der Vorteil der hier getroffenen Probenauswahl hat gerade darin bestanden, daß möglichst zahlreiche Werksteinarten teilweise auch unterschiedlichen Verwitterungsgrads für die Auswertung mit herangezogen worden sind. Nach und nach hat sich dann herausgestellt, welche Gesteine und aus welchem Grunde diese bei verschiedenartigen Funktionen immer wieder gleichsinnige Anomalien zeigen. Entsprechende Daten gezielt auszusondern, ist dann letztlich erst anhand der erhaltenen Ergebnisse möglich geworden.

Wenn Meßwerte von einem Kurvenzug merklich abweichen, muß das aber nicht immer auf ein systematisch bedingtes Verhalten des Materials zurückzuführen sein. Bei dem naturgemäß eingeschränkten Umfang der entnommenen Proben würden etwa Werte für Steine aus heterogenen Vorkommen - beispielsweise infolge Addition extremer Meßdaten - eine augenscheinliche Distanz zum repräsentativen Querschnitt verursachen. Einer solchen Verfälschung der tatsächlichen Verhältnisse wäre wohl nur noch durch Erhöhung der Anzahl von Messungen und Eliminierung offensichtlicher "Ausreißer" erfolgreich zu begegnen. Neben Anomalien aufgrund unzuverlässiger Meßwerte - z. B. der Wasseraufnahme oder dem Sättigungswert bei Gesteinen mit geringer Porosität (vgl. Abschnitt 2.3.1) - scheinen auch andere Faktoren ihren Niederschlag in den Resultaten zu finden. So ist hier die Quellung der Tonkomponente eines Materials zu nennen, die gelegentlich als Veränderung des Porengefüges auch den Feuchtigkeitstransport zu beeinträchtigen vermag. Es sollte noch erwähnt werden, daß in einigen Fällen zwar eine definierte stochastische Beziehung vorliegt, mancher Meßwert jedoch wegen starker Abweichung ausgesondert werden muß, ohne daß immer diejenige besondere Eigenschaft des betreffenden Baustoffs herauszufinden wäre, die hierfür eine hinreichende Erklärung hätte liefern können.

Beim Vergleich von verschiedenen Kennwerten ergeben sich gelegentlich Schwierigkeiten, weil ihnen nicht nur ein fundamentales Merkmal, sondern mehrere zugrunde liegen. Das könnte im Extremfall zur Folge haben, daß in der Darstellung einer solchen komplexen Größe als Funktion einer anderen der Kurvenverlauf bei gegenläufiger Wirksamkeit der Teilmerkmale spürbar beeinflußt und daher charakteristische Aussagen unterdrückt würden. Mit Unannehmlichkeiten dieser Art muß man immer dann rechnen, wenn die betreffenden Abhängigkeiten nicht nur auf eine einfache Grundlage zurückzuführen sind. Dies gilt indessen für viele der hier betrachteten Parameter. Die eigenen Befunde sowie Ergebnisse von E. J. P o l a k (159) machen deutlich, daß sich Korrelationskoeffizienten mitunter durch Sortierung der für die einzelnen Gesteinstypen bestimmten Kennwerte merklich verbessern lassen. Argumente hierfür liefern dem letzteren mechanische Eigenschaften, die in Feld- und Laborversuchen auf dynamischem Wege ermittelt worden sind. Manchmal ist es jedoch schwer, Literaturdaten zu Vergleichen heranzuziehen, weil sich die Gefügeeigenschaften der meisten beschriebenen Baustoffe nur selten ohne Vorbehalt auf die behandelten Sedimentgesteine übertragen lassen.

Auch das Verhalten einiger magmatischer Gesteine in der Natur hinsichtlich der Veränderung physikalischer, insbesondere mechanischer Merkmale (vgl. z. B. (77), (103)) kann mit einigen Abstrichen grundsätzlich auf die hier untersuchten Werksteine sedimentären Ursprungs übertragen werden. Wesentliche Abweichungen davon dürften ihre Ursache im Gefügebau, d. h. vor allem in der für den Feuchtigkeits(bzw. Lösungs-)transport verantwortlichen Anordnung der offenen Poren und ihrer Begrenzungen haben. Nach T. F. O n o d e r a et al. (154) lassen sich im Fall von Graniten kaum ein Wechsel im Mineralbestand, dafür aber eine ausgeprägte Neigung zur Entstehung von Mikrorissen feststellen, deren örtliche Häufung mit den Werten für Porosität und mechanische Festigkeit Hand in Hand geht. Allerdings muß man stets - in besonderem Maße bei Sedimentgesteinen - die für einzelnen Verwitterungszustände erhaltenen Merkmale ein und desselben Materials gedanklich streng voneinander trennen. Jeder weitere Schritt kommt, wie sich auch bei der simulierten Bewitterungsbeanspruchung von Carrara-Marmor im Kristallisationsversuch nachweisen läßt, offenbar in einer progressiven Vergrößerung des an hygrischen Transportvorgängen beteiligten Porenraums zum Ausdruck (1). Deshalb kann hier allenfalls der jeweilige Ausgangswert des betreffenden Werksteins von Interesse sein und müßte demnach, um Mißverständnissen vorzubeugen, mit demselben anderer Bausteine verglichen werden. Das bedeutet, daß man für die Erfüllung der gestellten Aufgabe möglichst "frische" Gesteinsproben heranziehen muß, wenn eine Vergleichbarkeit der erhaltenen Kennwerte gewährleistet sein soll.

Auf die fast unvermeidliche Frage, welche der verschiedenen Beanspruchungsarten jeweils maßgeblich ist, soll folgendes Beispiel Antwort geben: Unter dem Einfluß einer schwefeloxidhaltigen Atmosphäre kann das Porengefüge eines an sich frostwiderstandsfähigen, kalkhaltigen Baustoffs infolge Ablagerung von Calciumsulfat derart ungünstig verändert werden, daß nach mehreren natürlichen Frosttauwechseln eine Schädigung eintritt. Andererseits würden in einem gegenüber Frost anfälligen Gestein, das durchaus "SO<sub>2</sub>-unempfindlich" sein mag, durch Auflockerung des Gefügezusammenhalts im Laufe der Zeit Wege geschaffen werden, auf denen wiederum Sulfate in tiefere Schichten des Materials vordringen könnten. Diese

beiden Beanspruchungsarten lassen sich meist nicht eindeutig voneinander trennen, auch ist mit einer wechselseitigen Beeinflussung zu rechnen. Dies wird umso eher verständlich, wenn man sich die zahlreichen Faktoren vor Augen hält, die den Verwitterungsprozeß prägen (116), (145).

Daß solche Unwägbarkeiten zu Zweifeln Anlaß geben und in "Richtungskämpfe" ausarten können, belegen Diskussionen seit etwa Anfang des Jahrhunderts - einem Zeitpunkt, von dem an in Deutschland der  $\text{SO}_2$ -Angriff auf kalkhaltige Baustoffe erstmals ernsthaft diskutiert worden ist. Die seinerzeit von J. H i r s c h w a l d angebotene Klasseneinteilung zur Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinen (91) hat im wesentlichen petrografische Befunde zur Grundlage und gestattet offenbar nur, langfristige Materialveränderungen abzuschätzen. Porenraumbezogene Merkmale wie etwa der S-Wert oder die Wasseraufnahme berücksichtigen in der Regel nicht lokale Veränderungen an den Korngrenzen. Diese scheinen aber zumindest beim Kristallisationsversuch von besonderer Bedeutung zu sein, wie D. G. R. B o n n e l l und M. E. N o t t a g e (21) glaubhaft gemacht haben. Deshalb hat ein Versagen des erwähnten Bewertungssystems im Falle von  $\text{SO}_2$ -Angriff zwangsläufig eintreten können, wie aus jener unglückseligen Kontroverse zwischen H i r s c h w a l d und der damaligen Dombauverwaltung hervorgeht (90). Nach Ansicht jenes Autors wurde jedenfalls durch den von E. K a i s e r (106), (107) am Kölner Dom erbrachten Nachweis der  $\text{SO}_2$ -Verwitterung in das "kunstvoll aufgebaute System der Qualitätsklassen zur Bestimmung der Güte der Bausteine eine so große Bresche geschlagen, daß für seine Anwendung in der Praxis nicht viel übrigblieb", so daß "die Ergebnisse einer 15jährigen Forschungstätigkeit, schon bevor das große Werk überhaupt erschienen war, mehr oder minder zweifelhaft wurden, wenigstens in bezug auf die Lösung der Aufgabe, für welche in erster Linie die große Arbeit unternommen war, nämlich in der Beantwortung der 1893 gestellten Frage: 'Wie kann ein Stein, der Dauer verspricht, von einem Steine, der nicht Dauer verspricht, unterschieden werden?'" Eine hinreichende Antwort hierauf steht übrigens bis heute noch aus. Während K a i s e r bei dieser Auseinandersetzung als Kronzeuge für den Primat der "Rauchgasverwitterung" angerufen worden ist, hat H i r s c h w a l d (91), (92) dem  $\text{SO}_2$ -Angriff nur die Rolle eines Vehikels zugewiesen und demzufolge dem Frost die eigentliche Schuld für den Zerfall einiger am Dom verarbeiteter Gesteine zugeschoben. U. a. hat sich auch J. A. v a n d e r K l o e s (115) des Beispiels Kölner Dom zwecks Diskussion der phänomenologischen Aspekte angenommen und dabei als ganz wesentliche Ursache für die Gefügebeeinflussung von Baustoffen den osmotischen Druck ins Feld geführt. Zumindest zu Beginn der Auseinandersetzung ist nur wenig sachgerechte Information herausgekommen. Obwohl sich nach der Auffassung H. G ü l d e n p f e n n i g s (75) die beobachteten Verwitterungserscheinungen "so ganz und gar nicht in Übereinstimmung mit den seit altersher bekannten durch Wind und Wetter hervorgerufenen Zerstörungen bringen lassen", wurde dieser Meinung von H. B r e y e r (27) mit Nachdruck und meist wohl vermeidbarer Polemik widersprochen. Im Laufe der Zeit änderten sich die Standpunkte mit wachsender Polarisierung der Debatte, wobei nicht immer der Sachverstand obsiegte. Daß sich aber kaum ein Schaden - bei aller Objektivität der Betrachtung - vorbehaltlos einer einzigen Einflußgröße zuordnen läßt, haben beispielsweise auch G. M i l l o t et al. (140) an dem zum Teil schalenartig verwitternden Voltzien-Sandstein des Straßburger Münsters erfahren müssen. Zum

vorgefundenen Erscheinungsbild soll neben den beiden vorerwähnten Beanspruchungsursachen zusätzlich eine Gefügeschädigung infolge steinmetzmäßiger Bearbeitung beigetragen haben.

Noch ein Wort zur Probenvorbehandlung: L. O b e r t et al. (151) P. S. B. C o l b a c k und B. L. W i i d (38) sowie D. U. D e e r e und R. P. M i l l e r (41) haben auf die Veränderung insbesondere der mechanischen Parameter beim Übergang eines Materials von einem Zustand in den anderen zwischen "wassergesättigt", "lufttrocken" und "bis zur Massekonstanz getrocknet" sowie auf die damit verbundenen experimentellen Eigenheiten hingewiesen. Trotz einiger Bedenken ist das Material hier jedoch bis zur Massekonstanz getrocknet und ggf. anschließend bis zur Sättigung mit Wasser getränkt worden, wie es übrigens auch E. B r o c h und J. A. F r a n k l i n (29) für ihre Festigkeitsuntersuchungen bevorzugt haben. In einigen Fällen hat die verfügbare Materialmenge nicht für den gesamten Prüfumfang ausgereicht, weshalb dann wegen der höheren Anzahl an Meßpunkten bei der Auswertung einem vielleicht weniger signifikanten Parameter "stellvertretend" der Vorzug eingeräumt worden ist. Die meisten der eingesetzten Verfahren sind, wie man sehen kann, also nicht von jener gewünschten "universellen" Anwendbarkeit, was bei der komplexen Zusammensetzung der durch sie erfaßten Einzelmerkmale ja ohnehin kaum erwartet werden darf. Um bei der Korrelation allgemeine Gesetzmäßigkeiten nicht etwa zu verschleiern, sollte man eine bestimmte Versuchstechnik deshalb nicht auf alle möglichen Werksteine in gleicher Weise anwenden. Richtungsweisende Abhängigkeiten lassen sich viel eher dann erkennen, wenn "Ausreißer" eliminiert werden, wobei die Gründe hierfür jeweils einwandfrei feststehen sollten. Die Notwendigkeit einer gezielten Aussonderung der von der allgemeinen Tendenz abweichenden Meßdaten ist für das hier behandelte Gebiet keineswegs neu und bereits von W. A. S h e w h a r t ((189), S. 58) auf indirekte Weise zum Ausdruck gebracht worden: "Denn zur richtigen Beantwortung der meist spezifischen Fragestellungen ist es unerläßlich, daß das Meßwertkollektiv "die durch die Daten gegebene 'wesentliche Information' enthält, da wir doch anhand desselben die Fragen derart beantworten können, daß eine weitere Analyse der Daten unsere Antworten praktisch nicht in nennenswertem Umfang verändert".

Will man eine komplexe Beanspruchungsart lediglich mit Hilfe ihrer zwei wichtigsten Einflußfaktoren beschreiben, so verringert sich notgedrungen die Sicherheit der Aussage, bei Beschränkung auf nur einen aber in noch viel größerem Maße, weil dessen Beziehung zu weiteren Merkmalen dann nicht immer ausreichend definiert werden kann. Mithin ist die Vereinfachung lediglich durch einen Verlust an Exaktheit zu erkaufen, was wegen den von Natur aus lokal variierenden mechanischen Eigenschaften der Gesteine von M. M. P r o t o d ' y a k o n o v (162) keineswegs bedauert wird. Dieser Autor hat einfach anzuwendenden Verfahren den Vorzug gegenüber einer meist nicht unbedingt erforderlichen Genauigkeit gegeben, um so mehr Prüfmöglichkeiten zu haben, die ein breites Materialspektrum abdecken. Wie wenig hilfreich hierbei ein Prüfkonzept des "Alles oder Nichts" in Hinblick auf die Gesamtheit des Probematerials sein kann, läßt sich an etlichen Beispielen beweisen: So zeigt zwar mancher Baustoff ein spezifisches und gut reproduzierbares Verhalten beim Kristallisationsversuch, läßt sich jedoch infolge eines nur geringen Anteils an offenem Porenraum durch den S-Wert nur unzu-



reichend charakterisieren (vgl. Abschnitt 3.2.2). Trotz alledem ist zu empfehlen, für die Bewertung jener Gesteine mit kontinuierlichem Substanzverlust im Verlauf der Beanspruchung den entsprechenden Maßstabsfaktor heranzuziehen. Sollte sich jedoch z. B. auch bei Verwendung größerer Probekörper keine gleichmäßige Masseänderung erzielen lassen, dann müßte das Material eben ausschließlich visuell - wie etwa beim derzeit gebräuchlichen Frostversuch - beurteilt werden, womit man notgedrungen auf eine quantitative Zuordnung zu verzichten hätte.

Die Aussagekraft der meisten bisherigen Untersuchungen über die Abhängigkeit zwischen porenraumbezogenen bzw. verwitterungsrelevanten Merkmalen und mechanischen Eigenschaften findet man häufig durch den notorischen Mangel an Meßdaten beeinträchtigt, die von ein und derselben Materialgruppe zur Verfügung stehen. Im allgemeinen sind hier zahlreiche Bestimmungen - diese aber nur an einer zu geringen Anzahl unterschiedlicher Proben - ausgeführt worden (vgl. z. B. (87), (93) und (133)). Ebenso ist der umgekehrte Fall anzutreffen, daß, sofern Werte von zahlreichen Probenarten vorliegen, es meist an einer ausreichenden Anzahl von Materialparametern mangelt, die man untereinander mit Aussicht auf Erfolg in Beziehung bringen könnte (vgl. z. B. (5)). Klagen dieser Art sind nicht eben neu, denn da existiert bereits folgende frühe Anmerkung: "Es ist zweifellos, daß viele, ja sehr viele chemische und physikalische Untersuchungen der Bausteine durchgeführt werden müssen, bis man, wahrscheinlich auch nach manchem kleinen Irrwege, an das Ziel gelangt: 'Die Wetterbeständigkeit der Bausteine aufgrund von Laboratoriums-Untersuchungen zuverlässig bestimmen zu können'. Doch diese voraussichtlich großen und vielen Arbeiten, die da bevorstehen, dürfen die Arbeitslust nicht schwächen, da das Ziel wissenschaftlich und technisch lohnt" (94). Man scheint demnach damals schon die eigentliche und bis heute nur in Ansätzen verwirklichte Aufgabe klar erkannt zu haben. Zu den wenigen Arbeiten, die sich systematisch und auf der Grundlage hinreichend großer Meßwertkollektive der Untersuchung porenraumbezogener Merkmale annehmen, gehört neben denen von J. W. M c B u r n e y und C. E. L o v e w e l l (136) sowie D. B. H o n e y - b o r n e und P. B. H a r r i s (99) auch ein wesentlicher Beitrag von M. M a m i l l a n (130). Diese Autoren haben außerdem die Bedeutung von Porosität und S-Wert als Bewertungskriterien für die verschiedenen Sedimentgesteine unter dem Blickwinkel ihres Frostverhaltens deutlich machen können.

War es etwa die Bequemlichkeit des Verharrens in eingefahrenen Gleisen oder eher der Mangel an apparativen und interpretatorischen Möglichkeiten, die bei der quantitativen Erfassung des Porenraums von Baustoffen bisher fast ausnahmslos Porenvolumen und spezifische Oberfläche in den Vordergrund treten ließen, während Porengrößenverteilung, kapillarer Wasseraufstieg und Permeabilität nur ein Schattendasein führten? Gefragt ist also auch nach einer zweckdienlichen Auswahl von Eigenschaften und Merkmalen, die die Verwitterbarkeit eines Materials kennzeichnen und sich in möglichst einfacher Weise miteinander in Beziehung bringen lassen. Im Bericht der BRS von 1937 (34) wird hierzu angemerkt, daß die Korrelation von experimentellen Daten der beschriebenen Art eine entscheidende Aufgabe erfüllt, indem sie Grundlagen für Prüfmethode liefert, die auf eine möglichst schnell verfügbare praktische Information abzielen. Herausgearbeitet werden muß demnach eine beschränkte Anzahl von Verfahren, auch wenn deren Resultate eine umfassende Charakterisierung der Gesteine erst im Verbund ermöglichen.



Eine der Hauptdeutungsschwierigkeiten liegt darin, daß man letztlich nicht genau unterscheiden kann, ob und inwieweit eine Streuung der Werte tatsächlich das Baustoffverhalten widerspiegelt, von methodischen Fehlern beeinflusst wird oder aber lediglich lokal bedingte Heterogenitäten zum Ausdruck bringt (vgl. Abschnitt 2.1). Der letzte Punkt hat besondere Bedeutung, weil es nur in seltenen Fällen gelingt, mehrere Untersuchungen an ein und demselben Probekörper nacheinander durchzuführen, so daß man häufig auf die Probenahme von Material aus der nächsten Nachbarschaft angewiesen ist. Ziel künftiger Bemühungen muß es daher sein, in Ermangelung eines gemeinsamen Vergleichsstandards durch Sammeln von immer mehr Kenndaten die bereits erkannten funktionellen Gesetzmäßigkeiten zu untermauern, um dadurch eine Grundlage für die Beurteilung der Resultate im vorgenannten Sinne zu schaffen. Darüber hinaus ist es wichtig, trotz des Auffindens stochastischer Zusammenhänge die Warnung von O. G r a f (69) zu beherzigen, nicht solche Beziehungen wie die zwischen Druckfestigkeit und Sandstrahl-Verschleiß vorbehaltlos aufzustellen und daraus generelle Schlüsse für verschiedene Gesteine abzuleiten, "wenn auch in Gruppen, die wesensverwandt sind," eine entsprechende Abhängigkeit zu erkennen ist. Praktisch dürfte es allerdings schwer sein, in diesem Sinne Abgrenzungen vorzunehmen. Möglicherweise liegt hierin ein wesentlicher Grund dafür, daß die Deutung so mancher Merkmalskombination noch in den Kinderschuhen steckt.

Ein weiteres Problem der Auswertung besteht vor allem darin, daß man leicht in den Verdacht gerät, "Birnen mit Äpfeln" vergleichen zu wollen. Während funktionelle Zusammenhänge - beispielsweise innerhalb von mechanischen Merkmalsgruppen - aus der Literatur bekannt und teilweise auch gut gesichert sind, ist das für übergreifende Korrelationen etwa zwischen porenraumbezogenen und Festigkeitsmerkmalen bisher nur selten der Fall. Da in unterschiedlichen Fachgebieten in der Regel sehr differierende Betrachtungsweisen (sowie Interessenlagen) existieren, werden theoretisch gestützte "Querverbindungen" äußerst selten angetroffen. Das macht es erforderlich, die Auswahl geeigneter Parameter nach einer Art trial-and-error-Methode vorzunehmen. So setzt man sich zwar allen Gefahren einer empirischen Behandlung aus, findet aber Beziehungen, die sich als nützlich erweisen und manchmal erst im nachhinein z. B. anhand von Analogieschlüssen ihre Bestätigung erfahren.

Da offenbar bisher ein Standard nach der Art des "allgemeinen Ansatzes" für das Verwitterungsverhalten fehlt, an dem man die Brauchbarkeit irgendeines Parameters messen könnte, wird als Qualitätskriterium zunächst die Anzahl der Merkmale angesehen, mit der ein Kennwert in Beziehung zu bringen ist. Über die Berechtigung eines solchen Vorgehens kann man indessen streiten. Anhand eines gezielt zusammengestellten Prüfprogramms lassen sich auf diese Weise aber wesentliche Querverbindungen verdeutlichen bzw. entsprechende Ergebnisse anderer Autoren bestätigen. Das eigentliche Ziel könnten letzten Endes sein, durch Kombination mehrerer Daten eine Formel zur Voraussage des Verwitterungsverhaltens von Naturstein anzustreben, und zwar ähnlich dem von G. C. R o b i n s o n et al. (174) für Mauerziegel in Form eines relativen Index der Dauerhaftigkeit aufgestellten. Verwendet man dabei die in den Geowissenschaften gebräuchliche minutiöse Beschreibung eines Gesteins, gerät man jedoch nur allzu leicht in Gefahr, sich von der Fülle der Details "erdrücken" zu lassen und den Einblick in die

hier bedeutsamen Materialzustände zu verlieren, die in erster Linie Resultate der Wechselwirkung von Vorgängen im Porenraum und der Gefügefestigkeit sind. Deshalb erweist sich offenbar eine strenge Auswahl von quantifizierbaren Merkmalen für die Einschätzung des komplexen Baustoffverhaltens als unerlässlich, zumal die Verknüpfung einiger davon noch interpretatorische Rätsel aufgibt und sich ein "Brückenschlag" zur Verwitterung nicht immer ohne weiteres anbietet.

### 3.2 Literaturdaten und ihre Übertragbarkeit

Es ist zunächst der Versuch unternommen worden, geeignete Analogien aus der Literatur zu gewinnen. Bei einer entsprechenden Recherche wird jedoch sehr bald der Mangel an Materialkennwerten deutlich. Während sich zahlreiche Fachaufsätze mit den Zusammenhängen etwa zwischen Porengefüge und physikalisch-technischen Eigenschaften oder entsprechenden Modellvorstellungen befassen, bleiben die Forscher nur allzuoft eine Antwort auf die Frage nach zuverlässigen Daten und Vergleichen schuldig. Aus der relativ geringen Ausbeute einer mühseligen Suche werden hier einige Beispiele angeführt:

Obwohl sich wegen der komplexen Spannungszustände zwischen Eindruckhärte und anderen mechanischen Eigenschaften anhand theoretischer Erwägungen keine Gesetzmäßigkeiten ableiten lassen (vgl. (168)), werden solche - jedenfalls bei duktilen metallischen Werkstoffen - in der Praxis beobachtet (13). So sind von D. S. D u g d a l e (60) überwiegend für Metalle Relationen zwischen Vickershärte und Druckspannungen aufgestellt worden, die ihrerseits Stauchungen bis zu 0,15 % entsprochen haben. W. F. B r a c e (23) hat für kompakte, nahezu isotrope anorganische Materialien wie Kalkstein, Marmor, Anhydrit und Steinsalz, eine Vergleichbarkeit zwischen Vickershärte und Druckfestigkeit bei ähnlichem Deformationsverhalten gefunden. Daraus wird gefolgert, daß dem Begriff der Härte die gleiche Bedeutung zukommt wie dem Punkt auf der Spannungs-Dehnungs-Kurve, der der Druckfestigkeit entspricht. Beziehungen zwischen verschiedenen mechanischen Eigenschaften können bei magmatischen und sedimentären Gesteinen (vgl. (7), (23), (41), (104), (162), (168)) unterdessen schon als gesicherter Wissensstand gelten. Im Falle von basischen Gesteinen vulkanischen Ursprungs sind nach Z. A. H a t s a g o r t s i a n et al. (84) Querverbindungen zwischen Verschleißfestigkeit und Oberflächenhärte, jedoch nicht zwischen Druckfestigkeit und Verschleiß vorhanden.

Von G. T. H a r l e y (82) stammen Anhaltspunkte für die Abschätzung des Aufwands beim bergbaumäßigen Vortrieb. Er klassifiziert die Gesteine ausschließlich nach physikalisch-technischen Gesichtspunkten. Die hierfür ausgewählten Merkmale: die hereingewonnene Masse; die Härte - ausgedrückt in Form des Energieverbrauchs; die Zähigkeit bzw. Bröckeligkeit des Materials sowie das Auftreten von mechanischen Schwächezonen sind allgemein anwendbar und könnten möglicherweise ebenso für eine analoge Behandlung der Verwitterungsbeständigkeit nützlich sein. Das Ziel ähnlich angelegter Versuche von J.-P. L a u t r i d o u und J.-C. O z o u f (122) ist es übrigens gewesen, Informationen über das Frostverhalten von Carbonatgesteinen zu gewinnen. Erwähnenswert ist auch ein in seiner Art universeller Parameter für das mechanische Verhalten, den man ohne großen Aufwand

ermitteln kann, nämlich die "point load tensile strength" nach einem Verfahren des U. S. Bureau of Mines (7), (211). Entsprechende Resultate lassen jedenfalls darauf schließen, daß deren Korrelationsfähigkeit mit anderen Eigenschaften bzw. Merkmalen der Druckfestigkeit nicht nachsteht. Andererseits befinden sich Hinweise auf "Querverbindungen" zu Daten des Porengefüges (41), (71), (84), (104) oder gar zu Maßstäben für das Verwitterungsverhalten noch in einem früheren Stadium der Entwicklung. Bereits J. Watson ((208), S. 4-5) hat darüber berichtet, daß eine erhöhte Beständigkeit von Bausteinen häufig mit zunehmender Dichte und Druckfestigkeit Hand in Hand geht, wofür er sowohl die Festigkeit der Einzelbestandteile als auch die Art ihrer gegenseitigen Bindung verantwortlich macht. Diese Feststellung trifft sicher in vielen Fällen zu, kann aber aus heutiger Sicht nicht verallgemeinert werden. Schon frühzeitig ist Einspruch gegen unhaltbare Korrelationen erhoben worden, wie u. a. die Anfechtung einer Behauptung von E. Müller (141) beweist, daß die Druckfestigkeit aller möglichen Werksteine mit der Erhöhung ihrer Dichte in einem bestimmten Maße zunehme. Schon Böhm (s. (8)) hat nämlich erkannt, daß die Dichte eines Gesteins wesentlich von der seiner Mineralphasen abhängt und verschiedenartige Materialien gleicher Dichte daher eine recht unterschiedliche Festigkeit aufweisen können. Unter Berücksichtigung solcher Aspekte würden aber Baustoffe von gleichartigem Aufbau und Gefüge wie etwa die Sandsteine, sofern man sich auf diese beschränkt, einen stochastischen Zusammenhang zwischen mechanischer Festigkeit und Rohdichte - also auch dem Porenraumanteil - durchaus erwarten lassen. Das gilt sinngemäß auch für Kalksteine, wie etwa R. Houper et al. (100a) glaubhaft gemacht haben. Hier ist zu erwähnen, daß Z. A. Hattsa-gortsi an (83) et al. (84) neben allgemeinen Beziehungen zwischen Porosität bzw. Wasseraufnahme und der Druckfestigkeit von vulkanischem Glas, Tuffen und einigen Ergußgesteinen bei Basalt noch spezielle Anhaltspunkte für die Abhängigkeit dieser mechanischen Eigenschaft von der mittleren Porengröße geliefert haben. Von V. Alexandre Ferrandis (3) sind gleichfalls Untersuchungsergebnisse bekannt, die mechanische Merkmale keramischer Körper von der Porosität abhängig machen. Interessant ist ebenso ein Befund von D. E. Dunn et al. (61) an Sandsteinen, wonach eine funktionelle Beziehung zwischen Porosität und mehraxialer Festigkeit dadurch bestimmt wird, daß mit einer Vergrößerung des Porenraums auch weniger Gefügekörner voneinander getrennt werden müssen, um eine durchgehende Schwächezone zu erzeugen.

Der komplexe Parameter Verwitterungsverhalten hängt, wie schon H. W. Burrows (35) festgestellt hat, in hohem Grade von Art, Größe und Anordnung der Gefügekörner eines Sediments sowie seines Kornbindemittels ab. Nach G. C. Robinson et al. (174) läßt sich zwar weder Dichte noch Rohdichte immer in eine befriedigende gesetzmäßige Beziehung zur Druckfestigkeit von Baustoffen bringen, wohl aber die Wasseraufnahme. Außerdem vermuten sie einen Zusammenhang der Frostbeständigkeit mit Druckfestigkeit und Wasseraufnahme, wobei der zweite Parameter für die Voraussage des Beanspruchungsverhaltens übrigens dem ersten vorgezogen werden soll. M. Rocha (175) hat sich mit den mechanischen Eigenschaften von Graniten unterschiedlichen Zersetzungsgrads aus dem Untergrund eines Talsperrenneubaus befaßt und dabei Beziehungen zwischen der Scherfestigkeit und der Wasseraufnahme sowie der Dichte feststellen können. Die Zuverlässigkeit der Wasseraufnahme als Index für die Verwitterungsbeständigkeit selbst

ist jedoch u. a. von J. H i r s c h w a l d (91) für Natursteine und von L. A. P a l m e r und J. V. H a l l (156) für Ziegelmaterial in Frage gestellt worden. Nichtsdestoweniger wird immer wieder versucht, mit dem Ziel eines Zugriffs zur Verwitterung von Ziegeln die an Zeit und Mitteln recht aufwendigen Verfahren der "natürlichen" Freilagerung durch leicht gewinnbare Kennwerte zu ersetzen, wie sie beispielsweise Wasseraufnahme, S-Wert oder eines der Festigkeitsmerkmale darstellen (174).

Zu den wenigen richtungsweisenden Arbeiten gehört die von P. B o u s q u i é (22), die sich im wesentlichen mit Beziehungen zwischen porenraumbezogenen Daten, dem Frostwiderstand und der Wärmeleitfähigkeit von Kalksteinen befaßt. Diesem Autor ist es gelungen, anhand einer größeren Anzahl von Proben einige Korrelationstendenzen aufzuzeigen. Eine klare Linie ist aus den Befunden indessen noch nicht abzuleiten. Es läßt sich aber soviel sagen, daß das voraussichtliche Baustoffverhalten stets mit den Porenraumverhältnissen sowie den mechanischen Besonderheiten einhergeht, und daß ein "Verwitterungsparameter" demzufolge diese Merkmale irgendwie miteinzubeziehen hat. Auf die Dauer wäre demnach anzustreben, eines der von D. V. D ' A n d r e a et al. (7) sowie W. R. J u d d und C. H u b e r (104) angegebenen bzw. ähnlichen Verfahren, die es auf der Grundlage verschiedenartiger Kennwerte gestatten, die Druckfestigkeit von Natursteinen vorauszuberechnen, so auf andere Parameter auszuweiten, daß mit ihrer Hilfe schließlich auch eine Annäherung an den "allgemeinen Ansatz" für das Verwitterungsverhalten möglich wird.

### 3.3 Die Ergebnisse und ihre Deutung

#### 3.3.1 Porenraumbezogene und mechanische Merkmale als Beurteilungskriterien

##### Zusammenhänge und Grenzen ihrer Aussage

An dieser Stelle sei nochmals an die Bewertungskriterien H i r s c h w a l d s und ihre Anwendung bei der Gesteinsauswahl für den Kölner Dom zu erinnert (vgl. Abschnitt 3.1). Dieser Autor hat dabei u. a. den S-Wert als Grundlage gewählt, der auch in seiner später veröffentlichten Klasseneinteilung eine Rolle spielt (91). Verhältniszahlen wie diese sollen es gestatten, die Bedingungen für die Füllung des Porenraums zu erfassen. Außerdem ist von ihm der Quotient der Zugfestigkeit des Materials im wassergesättigten und im trockenen Zustand hierfür herangezogen worden. Solche Parameter berücksichtigen indessen lokale Veränderungen im Gefüge nicht. Das ist vermutlich auch die Hauptursache für das Dilemma H i r s c h w a l d s, dessen System eben keinen Anhaltspunkt für eine Schädigung durch Sulfateinwirkung hergibt. Denn bekanntlich unterliegen manchmal auch Gesteine mit geringem Kalkanteil der Zerstörung infolge Schwefeloxidangriff. Diese findet besonders dann statt, wenn das in Sulfat übergehende Calciumcarbonat als Kontaktzement zwischen den Gefügekörnern eines Sandsteins auftritt. Im Gegensatz zu dichten Gesteinen läßt sich dementsprechend die lokale Konzentration der so entstandenen Schwächezonen durch Anwendung des Kristallisationsversuchs besser in den Griff bekommen, da die Kornbindung unmittelbar beansprucht wird. Das grundverschiedene Verhalten dieser beiden Gesteinstypen kommt

auch in den Beziehungen zwischen dem entsprechenden Parameter sowie den porenraumbezogenen Verhältniszahlen, wie S-Wert und relativer Imprägnierungsgrad  $S_t$ , gegenüber dritten Merkmalen zum Ausdruck.

Sozusagen als Nebenprodukt beim Auftragen der Beziehungen zwischen der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Wasserkapazität  $\psi_k$  und den mechanischen Eigenschaften erhält man eine Aussage über die Verwertbarkeit von Ergebnissen. Es fallen nämlich offensichtlich immer Daten für solche Sandsteinproben aus dem Rahmen, auf die bereits Verwitterungseinflüsse im weitesten Sinne eingewirkt haben, was in einer Art gestörter Kornbindung (vgl. Abschnitt 3.1) zum Ausdruck kommt. Damit ist sie, wie aus Abb. 6 zu ersehen ist, zu einem regelrechten Selektionskriterium geworden (In diesen sowie den meisten folgenden Diagrammen wird neben dem Korrelations-Koeffizienten und dessen Signifikanz S bei 95 % statistischer Sicherheit auch die Anzahl der einbezogenen Meßwerte n angegeben). Aber nicht nur die im Bild dargestellte Beziehung zwischen Festigkeit und Materialfeuchtigkeit liefert entsprechende Hinweise. Vielmehr lassen sich Anomalien des Sandsteingefüges fast noch besser anhand der Zusammenhänge zwischen dem Wassereindring-Koeffizienten B (vgl. Abschnitt 2.3.2) und der einfachen Wasseraufnahme gemäß DIN 52 103 (49) bzw. der hieraus errechneten offenen Porosität  $\epsilon_0$  deutlich machen (Abb. 7). Beim Oberflächenverschleiß, der ja ein Maß für die Kornbindungsfestigkeit darstellt, scheint das weniger wichtig zu sein (vgl. später in Abb. 12). Grundsätzlich läßt sich also zeigen, daß angewitterte Sandsteine mit

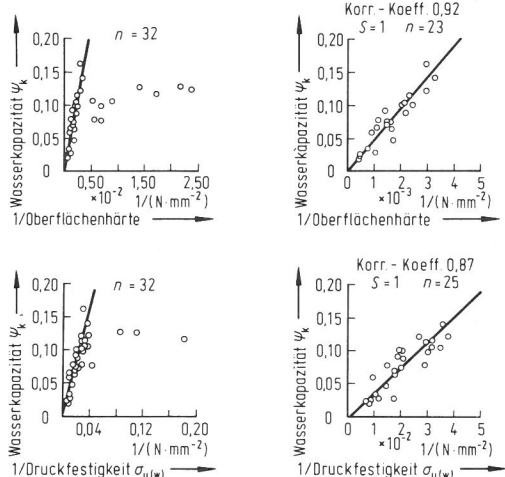


Abb. 6  
Einfluß der "gestörten" Kornbindung von Sandsteinen auf die Beziehung zwischen Wasserkapazität  $\psi_k$  und mechanischen Merkmalen

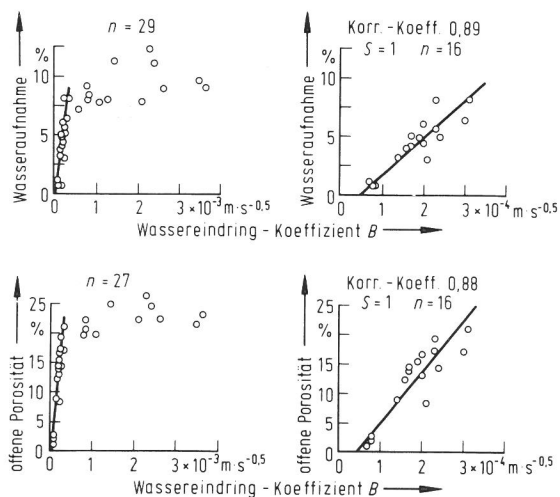
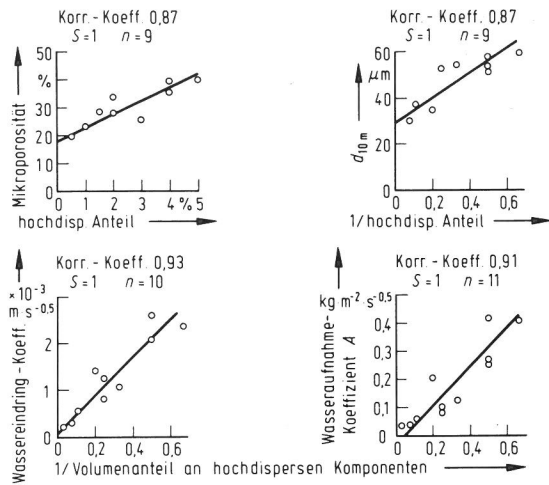


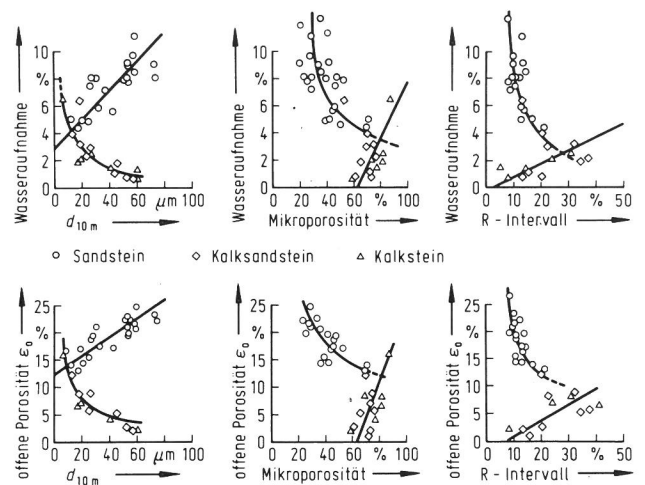
Abb. 7  
Einfluß der "gestörten" Kornbindung von Sandsteinen auf die Beziehung zwischen Wassereindring-Koeffizient B und Porosität

"gestörter" Kornbindung vom "normalen" Funktionsverlauf spürbar abweichen. Umgekehrt kann man aber auch die gemeinsamen Merkmale betrachten. Von den mit einem erhöhten hochdispersen Anteil der Proben verknüpften porenraumbezogenen Eigenschaften wird in Abb. 8 eine Auswahl vorgestellt. Bereits in einer früheren Arbeit (150) ist darauf hingewiesen worden, daß man Sandsteine bzw. Kalksandsteine mit geschwächter Kornbindung unter Vergleich der einzelnen "Verschleißtypen" von den übrigen trennen kann.





**Abb. 8**  
**Sandsteine mit "gestörter" Kornbindung:**  
**Zusammenhang zwischen porenraumbezogenen**  
**Merkmale und dem hochdispersen Anteil**



**Abb. 9**  
**Wasseraufnahme und offene Porosität der**  
**Sedimentgesteine als Funktion der ver-**  
**schiedenen Kennwerte der Porengrößen-**  
**verteilung**

Von der Aussagekraft der Meßwerte für die verschiedenen Parameter der Porengrößenverteilung (vgl. Abschnitt 2.3.3) ist ein ungefährender Eindruck zu gewinnen, wenn man diese beispielsweise mit der Wasseraufnahme oder der offenen Porosität  $\epsilon_0$  korreliert (Abb. 9). Dabei fällt auf, daß die Unterschiede des Porengefüges von Sandstein einerseits sowie Kalkstein und Kalksandstein andererseits in einer zueinander umgekehrten Beziehung zum Ausdruck kommen. Die Übergangsstellung der Kalksandsteine läßt sich aus ihrer jeweiligen Lage in den Diagrammen herleiten. Bemerkenswert scheint hier vor allem die Ähnlichkeit der jeweils vergleichbaren Kombinationen in ihrem Kurvenverlauf. Konsequenterweise wäre übrigens, daß  $d_{10m}$  der Mikroporosität umgekehrt proportional ist, denn bei den hier untersuchten Porengrößenspektren hat die Erhöhung des Werts für die 10%-Fraktile eine empfindliche Verringerung des Anteils an Mikroporen mit  $< 5 \mu m$  Durchmesser zur Folge. Diese phänomenologischen Unterschiede sind noch nicht hinlänglich zu interpretieren; frühere Ansätze in dieser Richtung (91) hat man wohl nicht weiter verfolgt oder wieder vergessen. Offenkundige Differenzen im Verhalten der beiden Extreme Sandstein und Kalkstein erklären sich vermutlich dadurch, daß man deren Gefüge in grober Vereinfachung einmal als Haufwerk von Kugeln betrachten kann, die an ihren Kontakten miteinander verbunden sind, während das andere Mal ein weitgehend kompakter Feststoff mit manchmal sogar hohlkugelähnlichen Poren vorliegt. Die geometrischen Unterschiede dürften also von konkaven Begrenzungsflächen eines Materials mit kugelförmigen Poren bis zu konvexen Grenzen an Kornkontakten detritischer Sedimentationsprodukte oder beispielsweise auch oolithischer Bildungen reichen. Eine solche Annahme würde durch die Beobachtung gestützt, daß manche Kalksteine bei einigen Parameterkombinationen in ihrem Verhalten stets den Sandsteinen vergleichbar sind, andere dagegen kaum. Hierin liegt vermutlich auch der Schlüssel für die unterschiedlichen Phänomene beim Feuchtigkeitstransport bzw. Eindringen von Imprägnierungsmitteln. Da es in der Regel jedoch nur unscharfe Übergänge gibt, reicht die Anzahl der Meßwerte selten aus, um eine weitere Unterteilung zu rechtfertigen. So bedeutet die in Bildunterschriften verwendete Bezeichnung "Sedimentgesteine" besonders bei der verhältnismäßig



geringen Anzahl an Messungen nichts anderes als: Sandsteine mit einigen Kalksteinen, die aber in ihrem Gefüge jenen offensichtlich ähnlich sind.

Festigkeit und Porenraum

Eine weitere Bestätigung scheinen solche geometrischen Vorstellungen dadurch zu erfahren, daß der Oberflächenverschleiß zwar mit der Porengrößenverteilung einen stochastischen Zusammenhang ergibt, jedoch in Verbindung mit anderen porenraumbezogenen Parametern etwa nach Art der Wasseraufnahme nicht so "erfolgreich" ist. Für Sandsteine läßt sich außerdem eine Beziehung zum  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$ -Quotienten herstellen (Abb. 10). Wie sich solche Verhältniszahlen untereinander verknüpfen lassen, geht aus den Diagrammen in Abb. 11 hervor. Der relative Imprägnierungsgrad  $S_t$  als Funktion der Wasserkapazität  $\psi_k$  zeigt - obgleich nicht so stark aus-

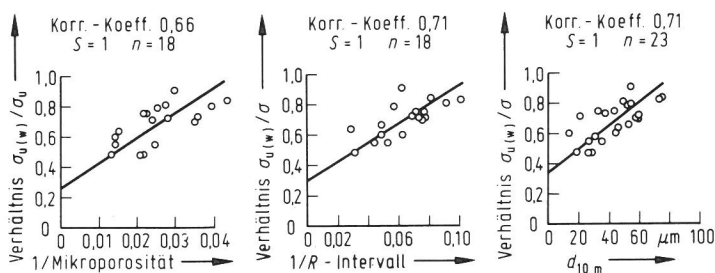


Abb. 10  
Das an Sandsteinen ermittelte Festigkeitsverhältnis  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  als Funktion der Porengrößenverteilung

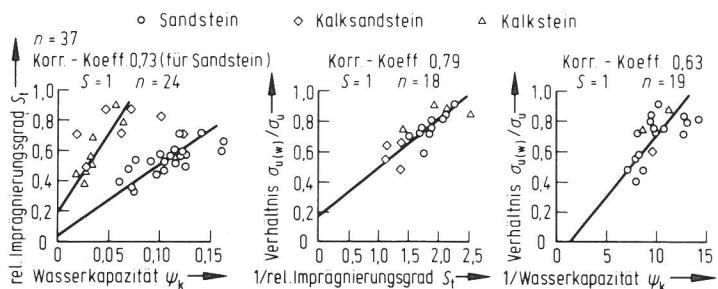
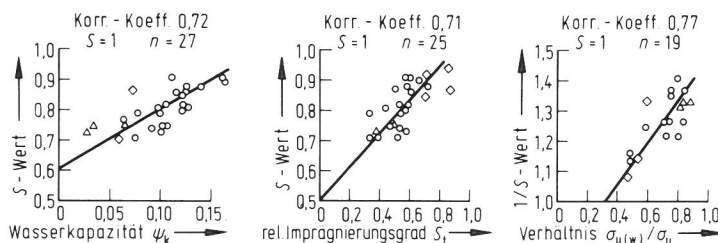


Abb. 11  
Zusammenhang zwischen porenraumbezogenen Merkmalen und dem Festigkeitsverhältnis  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  von Sedimentgesteinen

geprägt wie in Abb. 9 - eine Aufspaltung in Kalk- und Sandsteine. Andere Beziehungen lassen dagegen eine eindeutige Trennung nicht zu, was u. a. in Zusammenhang mit dem Mangel an geeigneten Werten gesehen werden kann. Manchmal ist kaum zu vermeiden, daß ausschließlich carbonatische Gesteine erfaßt werden, deren eigenständiger Kurvenverlauf den der Sandsteine gerade nur an einer Stelle berührt bzw. schneidet. Was die porenraumbezogenen Parameter anbetrifft, sind darüber hinausgehende Komplikationen zu erwarten: So wie sich Fehler für den S-Wert dadurch ergeben, daß seine Bestimmung als Folge zu geringer offener Porosität ungenau wird, ist bei annähernd vergleichbaren Quotienten, wie z. B. dem relativen Imprägnierungsgrad  $S_t$  (oder aber auch dem  $CCl_4$ -Füllungsgrad) mit einer ähnlichen Verhaltensweise zu rechnen. Die später in Abb. 37 gezeigten Diagramme liefern weitere Aussagen dafür, wie Porenfüllungsgrad und Porengrößenverteilung

miteinander in Beziehung stehen können. Hier und auch aus weiteren grafischen Darstellungen ist ersichtlich, daß sich beim S-Wert der Schnittpunkt mit der Koordinate in der Regel ungefähr bei 0,6 befindet (vgl. z. B. Abb. 11, 31 und 33 sowie zu einigen Aspekten dieses Problems Abschnitt 2.3.1).

Die zwischen den vorerwähnten Verhältniszahlen gefundene Abhängigkeit verliert keinesfalls an Aussagekraft, wenn man Proben mit hochdispersen Bestandteilen bzw. geschwächter Kornbindung (vgl. Abschnitt 3.1) auszusondern genötigt ist (siehe Abb. 6 und 7). Denn solche, in der Regel schon in einem "anomalen" späteren Entwicklungsstadium befindlichen Baustoffe haben für die vorliegenden Untersuchungen ja nur eine vergleichende Funktion und sollten in eine Untersuchung eigentlich gar nicht einbezogen werden. Die genannte Erscheinung beeinflusst aber nicht nur die Verknüpfung porositätsabhängiger Merkmale untereinander, sondern stört, falls man solche Meßwerte nicht eliminiert, ebenso bei der Beurteilung der Zusammenhänge zwischen mechanischen und porenraumbezogenen Kennwerten. So erhält man erst nach einem entsprechenden Eingriff in die Korrelation zwischen Wasserkapazität einerseits und Oberflächenverschleiß, Schleifverschleiß nach DIN 52 108 bzw. Druckfestigkeit  $\sigma_{u(w)}$  und Oberflächenhärte andererseits Ausgleichs-

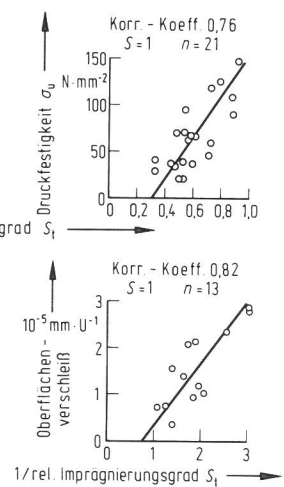
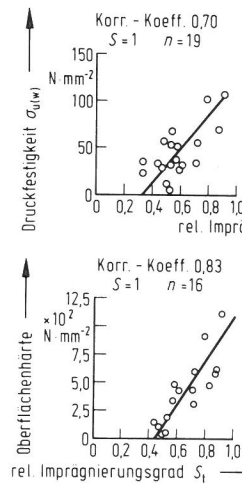
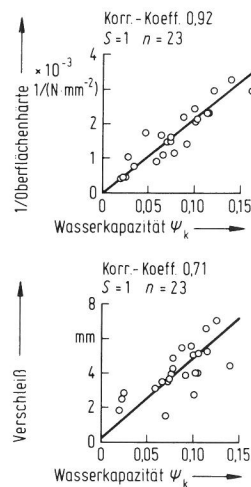
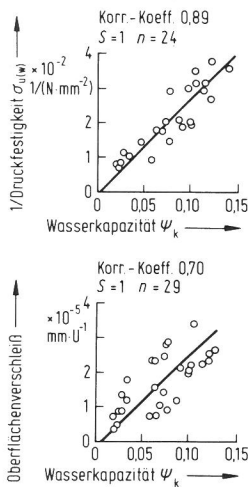


Abb. 12  
Beziehung zwischen mechanischen Eigenschaften und der Wasserkapazität  $\psi_k$  von Sedimentgesteinen

Abb. 13  
Beziehung zwischen mechanischen Eigenschaften und dem relativen Imprägnierungsgrad  $S_t$  von Sedimentgesteinen

geraden, um welche die Meßwerte nunmehr nur noch geringfügig streuen (Abb. 12). Mehr oder weniger stark ist dieses Phänomen auch bei anderen Beziehungen ausgeprägt. Bei Porenraumverhältnissen führen Bemühungen um das Erkennen stochastischer Zusammenhänge gleichfalls zu Teilerfolgen, wie sich anhand der Kombination mechanischer Kennwerte mit dem relativen Imprägnierungsgrad  $S_t$  zeigen läßt (Abb. 13). Man muß indessen berücksichtigen, daß hierbei eine "großzügigere" Eliminierung von streuenden Werten erforderlich wird, um hohe Korrelationskoeffizienten zu erhalten. Für den S-Wert ist dagegen eine Behandlung gleicher Art nicht möglich gewesen. Erwartungsgemäß kann auch eine umgekehrte Proportionalität zwischen Druckfestigkeit und Wasseraufnahme (Abb. 14) bzw. offener Porosität nachgewiesen werden. An Mauerziegeln hat O. K a l l a u n e r (108) in den 30er Jahren entsprechende mathematische Beziehungen gefunden. Ähnliche Ver-

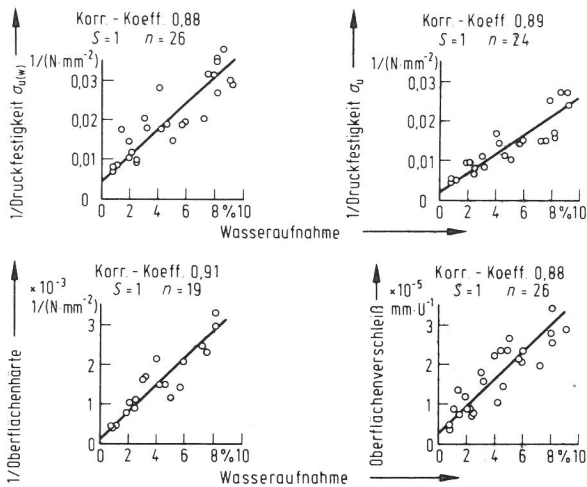


Abb. 14  
Beziehung zwischen mechanischen Eigenschaften von Sedimentgesteinen und der Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck

hältnisse haben unterdessen M. I. S m o r o d i n o v et al. (191) für Carbonatgesteine und P. D u f f a u t et al. (59) für verschiedenartige Sedimente beobachtet sowie eine gleichsinnige Beziehung der Wasseraufnahme zu Oberflächenhärte und dynamischem E-Modul von Kalk- und Sandsteinen festgestellt.

Wie die mechanischen Eigenschaften untereinander zusammenhängen, geht deutlich aus den Abb. 15 und 16 hervor und wird durch die Literaturergebnisse bestätigt. Von Interesse ist gleichermaßen, daß das in der Bundesanstalt entwickelte Schleifverschleiß-Verfahren gegenüber dem mit der Böhme-Scheibe offenbar "bessere" Werte zu liefern scheint. Der weitgehend gelungene Versuch, auch die Abhängigkeit des die Kornbindungsfestigkeit einbeziehenden Verschleißes von der Porengrößenverteilung zu konstruieren, kann als Zeichen dafür gelten, daß die Geometrie eines Korn- bzw. Porengefüges gleichfalls für das mechanische Verhalten Bedeutung hat. Ein gefügespezifisches Verhalten von Kalkgesteinen und Sandsteinen, wie es die gegenläufigen Kurven in Abb. 9 zeigen, ist bei solchen Beziehungen nicht (Abb. 17) oder nur undeutlich ausgeprägt. Demgegenüber erfolgt

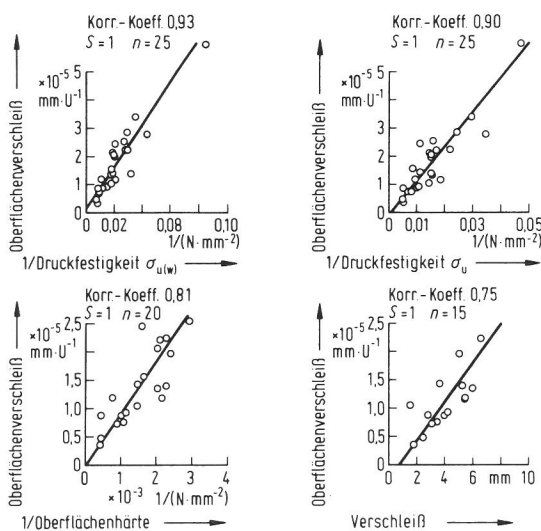


Abb. 15  
Beziehungen mechanischer Eigenschaften von Sedimentgesteinen untereinander; y = Schleifverschleiß (BAM-Verfahren)

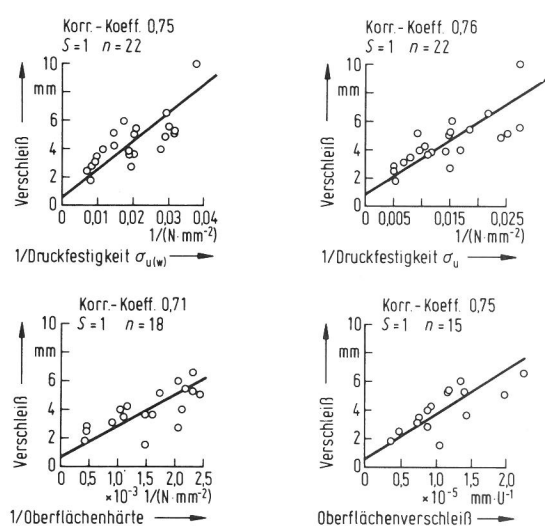


Abb. 16  
Beziehungen mechanischer Eigenschaften von Sedimentgesteinen untereinander; y = Schleifverschleiß nach DIN 52 108

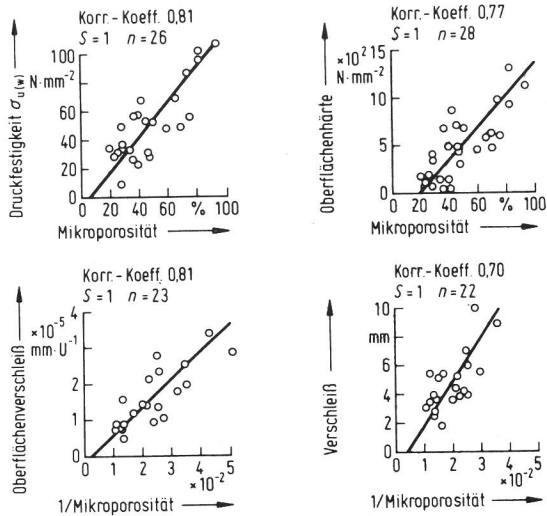


Abb. 17  
Mechanische Eigenschaften von Sedimentgesteinen als Funktion der Porengrößenverteilung

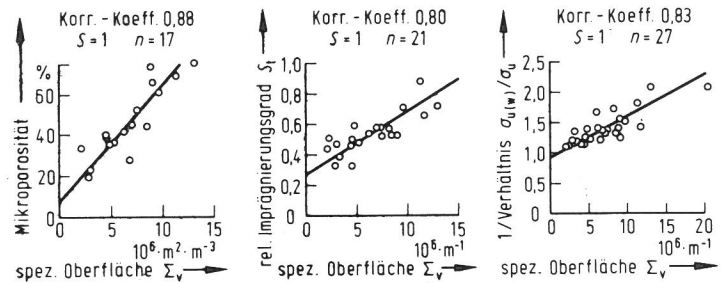
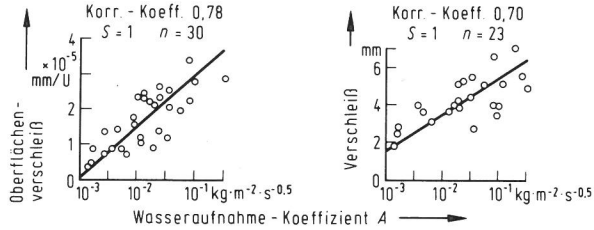
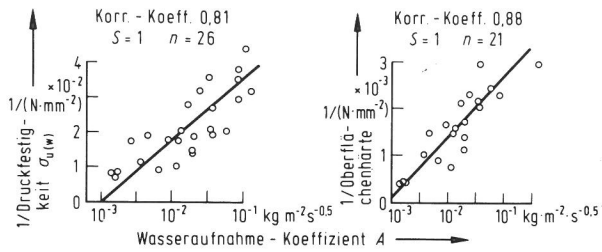


Abb. 18  
Porenraumbezogene und mechanische Merkmale von Sedimentgesteinen als Funktion der spezifischen Oberfläche

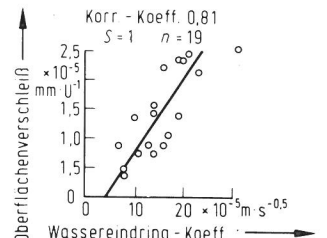
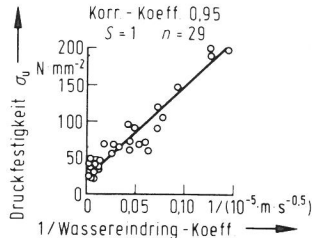
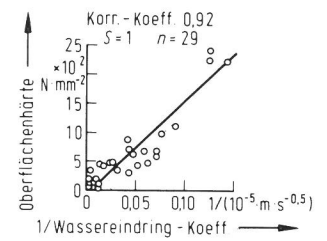
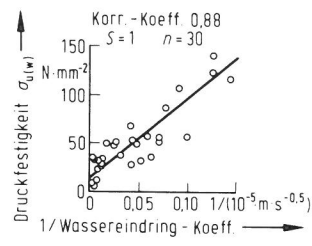
in Funktionen mit  $d_{10m}$  und dem R-Intervall eine "Aufspaltung". Allerdings wird dort das verbleibende Meßwertkollektiv für Kalkgesteine in der Regel zu klein und demzufolge die Streuung so groß, daß sich das Auftragen der betreffenden Kurven nicht mehr lohnt.

Als wahrscheinlich weniger bedeutsam, aber dessenungeachtet aufschlußreich für die durch Materialdispersität vorgegebene Angriffsfläche gegenüber aggressiven Medien haben sich auch Beziehungen zu der volumenbezogenen spezifischen Oberfläche  $\Sigma_v$  (vgl. Abschnitt 2.3.5) erwiesen. Abb. 18, die eine Auswahl entsprechender Merkmal-kombinationen vorstellt, gibt hierfür Ansatzpunkte, wobei Proben mit "gestörter" Kornbindung wiederum nur ungenügend in diesen Rahmen einzuordnen sind. So hat G. G. Litvan (127) gefunden, daß die Komplexität der hygri-schen Parameter die Prognose einer Reihenfolge der Beständigkeit nicht gerade fördert, auch wenn sich jedes Einzelmerkmal durchaus quantitativ erfassen läßt. Aus diesem Grund und pragmatischen Erwägungen räumt er dem Porengefüge den Vorzug ein und hat bei Mauerziegeln mit der nach der BET-Methode bestimmten spezifischen Oberfläche entsprechende Teilerfolge erzielen können.

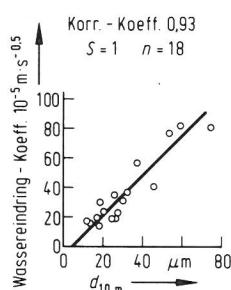
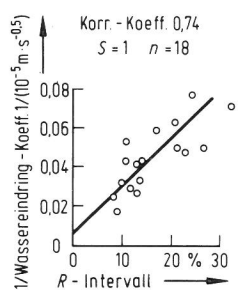
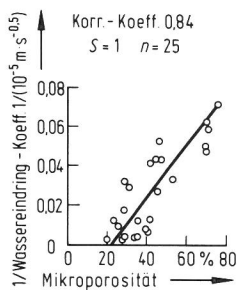
Aus den Ergebnissen (Abb. 19) geht allerdings nicht hervor, weshalb sich Kombinationen von mechanischen mit porenraumbezogenen Kennwerten, wie etwa dem Logarithmus des Wasseraufnahme-Koeffizienten A (vgl. Abschnitt 2.3.2), miteinander korrelieren lassen. Ein vergleichbares Verhalten zeigen - und das sogar in linearer Abhängigkeit - einfache Beziehungen zum Wassereindring-Koeffizienten B (Abb. 20). Dieser läßt andererseits aber nicht nur eine deutliche Verknüpfung mit den Kennwerten der Porengrößenverteilung (Abb. 21) sondern auch mit anderen porenraumbezogenen Parametern erkennen (Abb. 22).



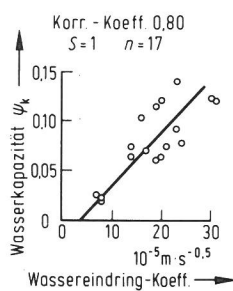
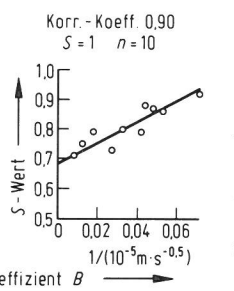
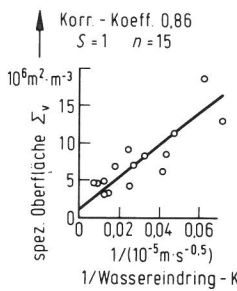
**Abb. 19**  
 Beziehung zwischen mechanischen Eigenschaften und dem Wasseraufnahme-Koeffizienten A von Sedimentgesteinen



**Abb. 20**  
 Beziehung zwischen mechanischen Eigenschaften und dem Wassereindring-Koeffizienten B von Sedimentgesteinen



**Abb. 21**  
 Der Wassereindring-Koeffizient B von Sedimentgesteinen als Funktion der Porengrößenverteilung



**Abb. 22**  
 Zusammenhang zwischen verschiedenen porenraumbezogenen Merkmalen und dem Wassereindring-Koeffizienten B von Sandsteinen

### Materialgefüge und Porenraum

In der Gesteinskunde ist eine exakte Bestimmung von quantifizierbaren Merkmalen weitgehend auf monokristalline, allenfalls monomineralische bzw. einphasige Bereiche - also in der Regel auf die einzelnen Gefügekörner - beschränkt. Die physikalisch-technischen Eigenschaften der hier untersuchten Sedimentgesteine sind aber von deren Besonderheiten nur selten oder in geringem Maße abhängig. Dies trifft anscheinend eher auf die geometrische Anordnung der Gefügebestandteile, die ihrer Zwischenräume sowie die Art der Kornbindung zu. Andere petrographische Merkmale - wie etwa Anzahl der umgebenden Körner, Fläche des Kornkontakts, Rundungsgrad etc. - können ebenfalls kaum weiterhelfen. Meist bieten erst indirekte Verfahren zur Charakterisierung der Kohäsionsverhältnisse einige Aus-

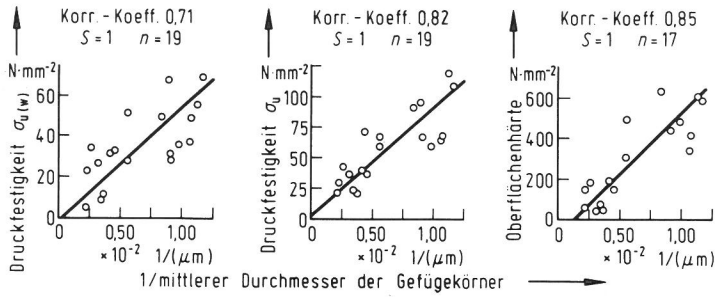


Abb. 23  
Mechanische Eigenschaften von Sandsteinen als Funktion des mittleren Durchmessers der Gefügekörner

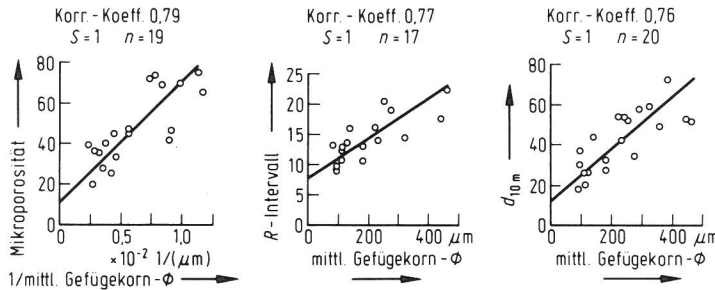


Abb. 24  
Beziehung zwischen der Porengrößenverteilung von Sandsteinen und dem mittleren Durchmesser der Gefügekörner

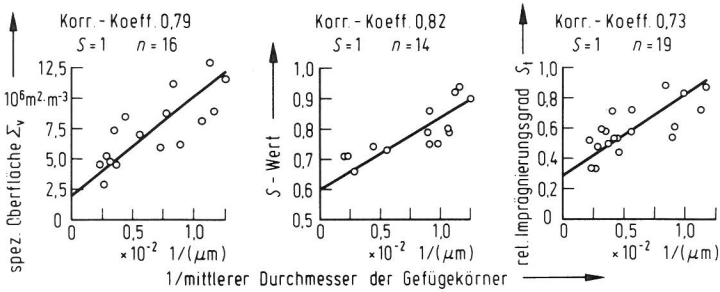


Abb. 25  
Beziehung zwischen porenraumbezogenen Merkmalen von Sandsteinen und dem mittleren Durchmesser der Gefügekörner

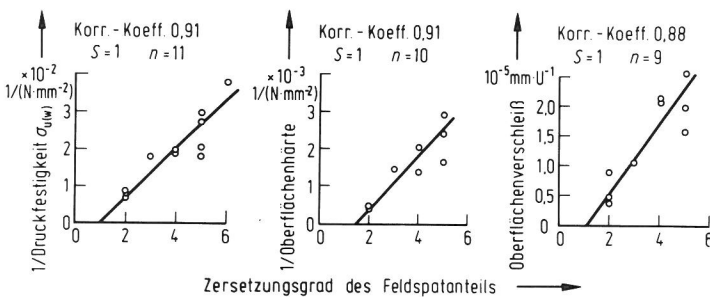


Abb. 26  
Mechanische Eigenschaften von Feldspat-Sandsteinen als Funktion von deren Zersetzungsgrad

sicht auf Erfolg. Eine Ausnahme hiervon scheint bei Sandsteinen die mittlere GefügekorngroÙe zu sein, deren Verknüpfung mit mechanischen Merkmalen aus Abb. 23 und mit Parametern der Porengrößenverteilung aus Abb. 24 hervorgeht. Eine mögliche Ursache für die größere Streuung im Falle von  $\sigma_{u(w)}$  gegenüber  $\sigma_u$  ist vermutlich darin zu suchen, daß der letztere vor allem mit der Geometrie zusammenhängt, während in  $\sigma_{u(w)}$  zusätzlich eine unterschiedliche Sensibilität gegenüber dem Kontakt mit Wasser zum Ausdruck gebracht wird. Auch andere porenraumabhängige Merkmale zeigen Beziehungen zum mittleren Durchmesser der Gefügekörner (Abb. 25). Darüber hinaus hat ein petrografischer Parameter vorzugsweise auf die mechanischen Eigenschaften feldspathaltiger Sandsteine Einfluß. Es handelt sich um den in Abschnitt 2.2.1 erwähnten Zersetzungsgrad des Feldspatanteils, der naturgemäß mit nur wenigen Werten belegt werden kann, weil man hier ausschließlich Gesteine zu berücksichtigen hat, bei denen die hochdisperse Komponente eindeutig auf Feldspatumwandlung zurückzuführen ist (Abb. 26).



Einige Kombinationen lassen sich nicht in das bisherige Funktionsschema einordnen, sondern erst durch logarithmische Teilung einer Koordinatenachse linear darstellen. Beziehungen zu Merkmalen wie Wasseraufnahmekoeffizient  $A$  oder Luftpermeabilität  $D_s$  (vgl. Abschnitt 2.3.4) gehören hierher. Hinweise dafür, daß man beispielsweise die Permeabilität von Sandsteinen parallel zu ihrer  $s$ -Fläche mit der offenen Porosität und der spezifischen Oberfläche in Zusammenhang bringen, aber nur unter bestimmten Voraussetzungen daraus errechnen kann, sind aus den Befunden von H. M e d e r (138) an Sandsteinen mit bis zu 25 % Carbonatanteil herzuleiten. Ob man die mit Hilfe von kapillaren Saugversuchen erhaltenen Werte senkrecht oder parallel zur jeweiligen Schichtfläche ermittelt, ist für das hier untersuchte Probematerial praktisch unerheblich, da zwischen beiden in der Regel nur geringfügige Differenzen auftreten. Weit empfindlicher auf die räumliche Anordnung der Gefügekomponenten scheinen dagegen die Luftpermeabilitätswerte zu reagieren. P. B o u s q u i é (22) hat eine solche Abhängigkeit für Kalksteine feststellen können. Eine Übertragung derselben auf die vorliegenden Gesteine bereitet keine Mühe und mag die Gültigkeit dieser Beobachtung bestätigen (vgl. Abb. 27 und 28). Die in Abb. 28 enthaltenen Daten widersprechen dagegen den Ergebnissen von P. K. C. W i g g s (210), der aus theoretischen Erwägungen heraus grundsätzlich "keine einzige Beziehung zwischen Porengrößenverteilung und Gaspermeabilität" gegeben sieht. Darüber hinaus sind ebenso an-

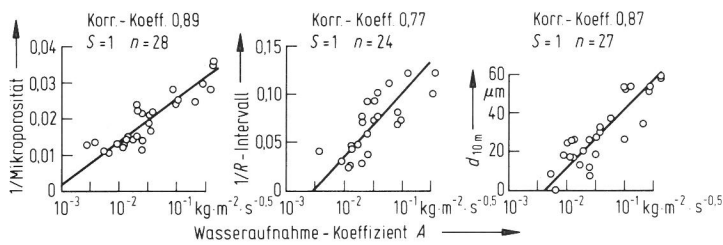


Abb. 27  
Beziehung zwischen der Porengrößenverteilung und dem Wasseraufnahmekoeffizienten  $A$  von Sedimentgesteinen

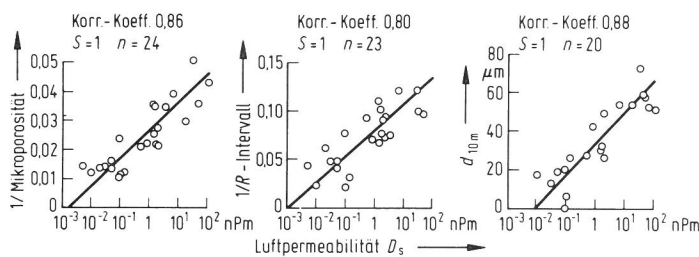


Abb. 28  
Beziehung zwischen der Porengrößenverteilung und der Luftpermeabilität  $D_s$  von Sedimentgesteinen

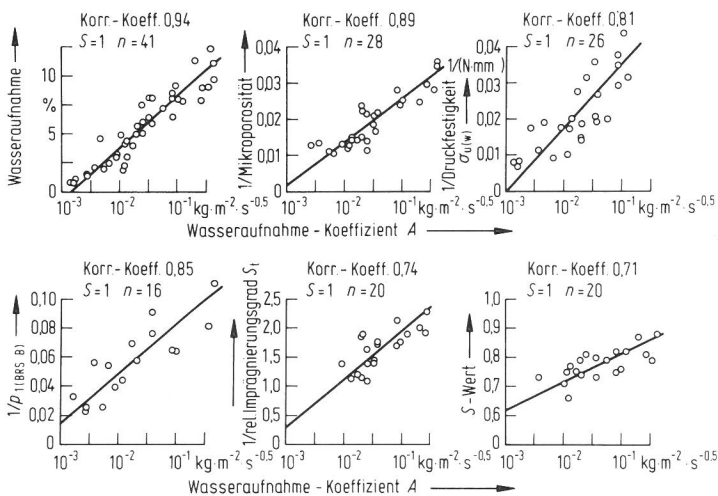


Abb. 29  
Beziehung zwischen ausgewählten Merkmalen und dem Wasseraufnahmekoeffizienten  $A$  von Sedimentgesteinen

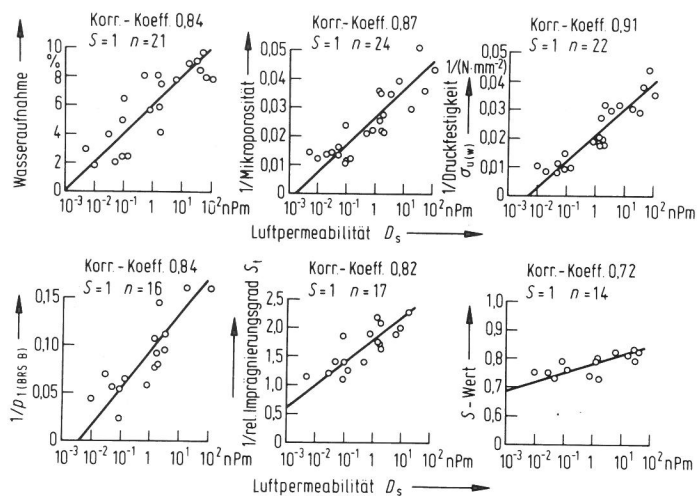


Abb. 30  
 Beziehung zwischen ausgewählten  
 Merkmalen und der Luftpermeabilität  
 $D_s$  von Sedimentgesteinen

dere Parameterkombinationen möglich, wie eine Auswahl von Diagrammen in den Abb. 29 und 30 beweist. Ein logarithmischer Zusammenhang zwischen Permeabilität und mechanischen bzw. porenraumbezogenen Merkmalen läßt sich übrigens schon aus den Resultaten einer früheren Arbeit über feuerfeste Baustoffe ablesen (133a).

### 3.3.2 Kristallisationsversuch als Kriterium

Ein Teil der in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Kombinationen bzw. die entsprechenden stochastischen Beziehungen sind eher durch Zufall erhalten worden und hinsichtlich der Verwitterbarkeit noch keinesfalls vollständig zu interpretieren. Voraussetzung für eine geeignete Methode zur Einschätzung des Materialverhaltens wäre unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.1 erwähnten Einschränkungen, daß von den zahlreichen möglichen Beanspruchungsarten die wesentlichen erfaßt würden. Der Kristallisationsversuch mit seinem direkten Zugang zum Verwitterungsgeschehen liefert hier indessen eine gesicherte Grundlage. Von außerordentlicher Wichtigkeit ist dafür wie auch im Falle der Frosttauwechsel-Prüfung die Belastung des Gefüges bzw. der Porenwandungen durch Volumenänderung bei Kristallisation oder Hydratation. Derartige Gemeinsamkeiten werden durch einen Bericht der BRS von 1937 ((34), S. 28) bestätigt, in dem die Rede davon ist, daß Frost- und allgemeine Verwitterungsbeständigkeit nicht notwendigerweise Synonyme sind, und die Bausteine, die zur Schädigung durch Frost neigen, doch ebenso wahrscheinlich dem Angriff andersartiger Faktoren unterliegen. Man darf allerdings nicht vergessen, daß die für eine Kennzeichnung des Frostwiderstands "vorgesehenen Prüfungen bis heute keine vollständig zufriedenstellenden" Lösungen liefern können (143). Andererseits läßt sich aus den Ergebnissen des Kristallisationsversuchs bei Anwendung einer neuartigen Auswertmethode (vgl. Abschnitt 2.5.2) schließen, daß dieser möglicherweise besser imstande ist, die Verhältnisse zu erfassen als der seit langem eingeführte S-Wert, der lediglich den Porenfüllungsgrad beschreibt. Der Hauptgrund hierfür dürfte darin zu suchen sein, daß ein Spannungsgradient zwischen Oberfläche und Steininnerem als Folge der peripheren Salzablagerung in besonderer Weise den lokalen Gegebenheiten bei der

Frostbeanspruchung am Bauwerk Rechnung trägt. Bei einem Vergleich von Kristallisationsversuch und Frostprüfung mag es manchem zweifelhaft erscheinen, warum gerade der erstere ein geeignetes Verfahren darstellen soll, da hierbei doch die Anreicherung des sprengenden Salzes lediglich im Oberflächenbereich der Probe erfolgt, während wassergesättigtes Material der Einwirkung von Frost über den gesamten Porenraum unterliegt. Eben diese Aussage scheint den Kern des Problems zu treffen, denn im Gegensatz zum ersteren lassen sich die Resultate der bisher üblichen Laborprüfung gemäß DIN 52 104 (51) oft nur schlecht mit dem tatsächlichen Verhalten des Gesteins vergleichen (vgl. Abschnitt 2.5.1).

Was die Möglichkeit einer Kennzeichnung im Sinne jenes "allgemeinen Ansatzes" mit einer nicht allzu aufwendigen Methode anbetrifft, so nimmt der Kristallisationsversuch gleichfalls eine Sonderstellung ein. Nach experimenteller Erfahrung und eigenen Beobachtungen liefert er die bisher zuverlässigsten Beurteilungsgrundlagen, denn er berücksichtigt nicht nur die mechanische Einwirkung auf das Gefüge. Die Sulfatverwitterung durch Reaktion der Kalkkomponente mit den atmosphärischen Luftverunreinigungen wird gleichzeitig im Zuge der ständigen Wechsel von Auflösung und Ausscheidung des Natriumsalzes wenigstens zum Teil nachgeahmt. Insgesamt kann man den Versuch von den relevanten Verfahren zu den universellsten und damit aussichtsreichsten für Sedimentgestein der beschriebenen Art rechnen.

Durch Anwendung dieser "Direktmethode" zur Vorausbeurteilung ist es in Verbindung mit dem vorerwähnten Auswertverfahren gelungen, verschiedene Kennwerte besser als bisher untereinander in Beziehung zu bringen. In Ermangelung eines Bezugspunkts bieten sich zur vergleichenden Kontrolle der Qualität des Parameters  $p_1$  der WEIBULL-Verteilung ersatzweise bekannte Charakteristika wie etwa der Sättigungswert gemäß DIN 52 113 (57) an (Abb. 31). Auf einen entsprechenden Zusammenhang zwischen dem letzteren und dem Kristallisationsversuch haben D. B. Honeyborne und P. B. Harris (99) bereits hingewiesen. Nimmt man also jene seit langem als einigermaßen zuverlässig geltende Verhältniszahl als Orientierungshilfe, läßt sich die Eignung des Parameters  $p_1$  bestätigen. Weiterhin bewähren sich insbesondere die schärfsten und damit scheinbar praxisfernen

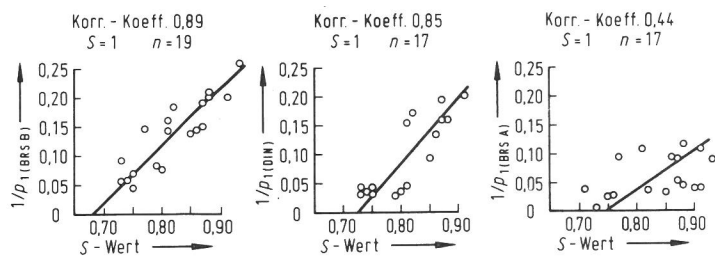


Abb. 31  
Drei Varianten des Kristallisationsversuchs: Beziehung zwischen  $p_1$  und dem Sättigungswert von Sedimentgesteinen

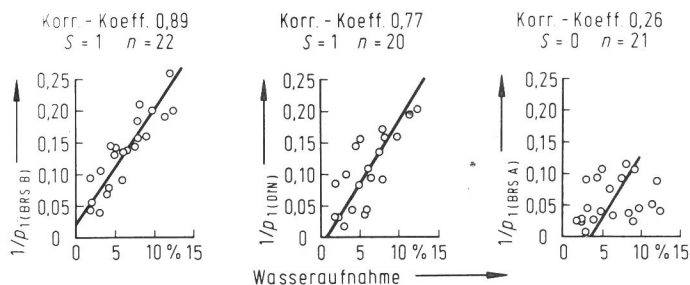


Abb. 32  
Drei Varianten des Kristallisationsversuchs: Beziehung zwischen  $p_1$  und der Wasseraufnahme von Sedimentgesteinen bei Atmosphärendruck

Varianten mit gesättigter Natriumsulfatlösung am besten. Demgegenüber werden bei der schwächeren Konzentration von nur 14 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  offenbar unerwünschte Nebeneffekte wirksam, die die Streuung der Meßwerte verstärken, was sich u. a. auch in der Beziehung zur Wasseraufnahme (Abb. 32) zeigt. Obwohl britische Forscher (32), (161) von der BRS-Variante A des Kristallisationsversuchs - also der mit der schwächsten Konzentration der Lösung (vgl. Abschnitt 2.5.2) - wegen ihrer verminderten Intensität eine optimale Annäherung an die "natürlichen" Gegebenheiten am Bauwerk erwarten, reagieren die betreffenden Meßwertfolgen offensichtlich gerade wegen der verhältnismäßig milden Beanspruchung der Proben sehr empfindlich auf material- und versuchsspezifische Besonderheiten.

In Hinblick auf eine Verknüpfung mit anderen Porositätsmerkmalen wie etwa der Wasserkapazität  $\psi_k$  - also dem volumenbezogenen Feuchtigkeitsgehalt unmittelbar hinter einer im Gestein aufsteigenden Wasserfront - läßt sich der Parameter  $p_1$  mit Erfolg verwenden (Abb. 33). Auch Porenfüllungsgrad und Porenspektrum sind hiermit in Beziehung zu bringen. Eine entsprechende Neigung zeigen Verhältniszahlen nach der Art des S-Werts oder relativen Imprägnierungsgrads  $S_t$  (E. L e a r y (123)). Sehr bald zeichnen sich jedoch die Grenzen der Anwendbarkeit des Versuchs ab, weil die Anzahl der Meßwerte für Kalksteine und Kalksandsteine mit geringer Wasseraufnahme wegen ihres anomalen Verhaltens auf nicht mehr repräsentative Reste reduziert wird (Abb. 34). Das gleiche gilt in ähnlicher Weise für Druckfestigkeit und Oberflächenhärte. Derartige Beziehungen zu den Ergebnissen der Prozedur der Variante BRS B sind aus den Diagrammen in Abb. 35 zu entnehmen. Auch andere Autoren (82a) haben - allerdings für gebrochenen Kalkstein und Dolomit nach ASTM C 88-76 (11a) - eine Korrelation zwischen den Ergebnissen des Kristallisationsversuchs und der Wasseraufnahme bzw. der Eindruckhärte deutlich ausgeprägt gefunden. Über einen direkten Zusammenhang mit dem poren-

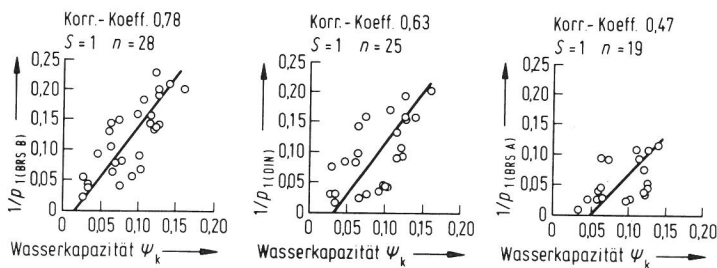


Abb. 33  
Drei Varianten des Kristallisationsversuchs: Beziehung zwischen  $p_1$  und der Wasserkapazität  $\psi_k$  von Sedimentgesteinen

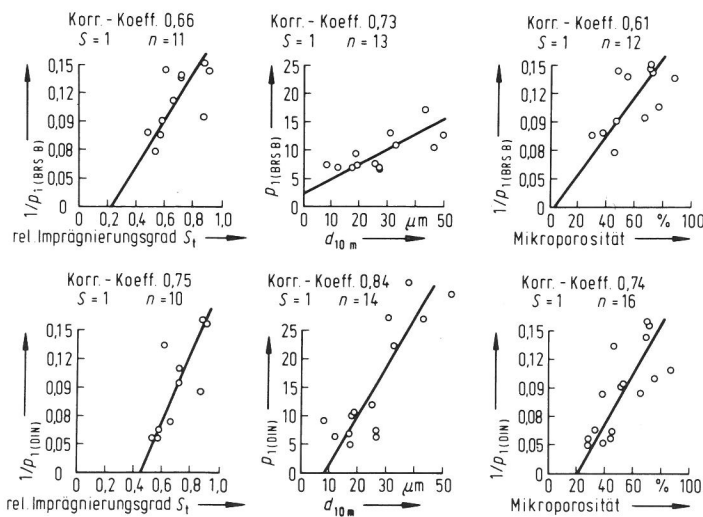
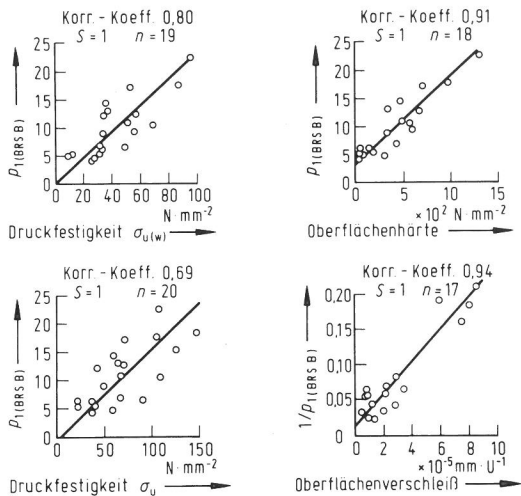
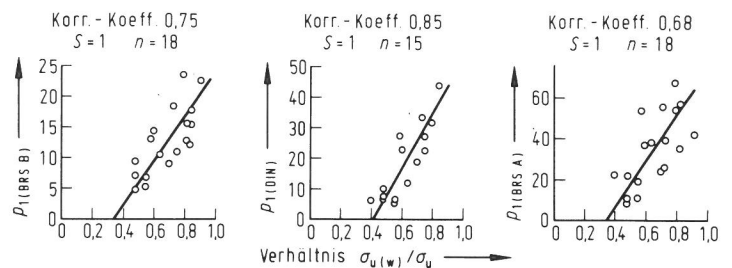


Abb. 34  
Die beiden intensivsten Varianten des Kristallisationsversuchs an Sandstein:  $p_1$  als Funktion porenraumbezogener Merkmale



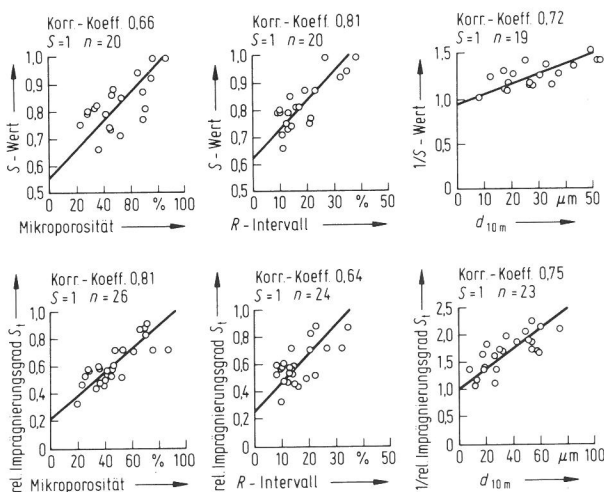
**Abb. 35**  
 Intensivste Variante des Kristallisationsversuchs:  $p_1$  als Funktion mechanischer Merkmale von Sedimentgesteinen



**Abb. 36**  
 Drei Varianten des Kristallisationsversuchs: Beziehung zwischen  $p_1$  und dem Festigkeitsverhältnis  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  von Sandsteinen

raumbezogenes Merkmal ist jedoch schon früher berichtet worden (212a). Die vorerwähnte Verringerung der Meßpunktanzahl läßt sich ebenso für den bei Sandsteinen meist aufschlußreichen Quotienten aus der Druckfestigkeit von wassergesättigtem  $\sigma_{u(w)}$  und trockenem Material  $\sigma_u$  (Abb. 36) nachweisen. Darüber hinaus zeigt sich hier, daß im Gegensatz zu den entsprechenden Diagrammen in Abb. 31 und 32 mit der sanfteren Verfahrensvariante A – wie schon erwähnt – eine bessere Korrelation zu erhalten ist. Die mit dem Porenraum sowie der Festigkeit des Gefüges verbundenen Eigenschaften und Merkmale dem Resultat des Kristallisationsversuchs zuzuordnen, ist aber vermutlich erst dann zweckmäßig, wenn eine solche Abhängigkeit mit Hilfe der multiplen linearen Regression wenigstens in Beziehung zu einem dritten Merkmal gebracht werden kann.

Während die derzeit übliche, genormte Prozedur für die Beurteilung des Frostwiderstands von Baustoffen nicht befriedigt, hat sich doch ein das Frostverhalten mittelbar charakterisierendes Porenraumverhältnis, nämlich der relative Imprägnierungsgrad  $S_t$ , hier als nützlich erwiesen (Abb. 37). Dem Kristallisationsversuch, dem S-Wert und dem  $S_t$ -Wert ist bei der Einschätzung der Verwitter-



**Abb. 37**  
 Verhältniszahlen von Feuchtigkeitsanteilen in Sedimentgesteinen als Funktion der Porengrößenverteilung

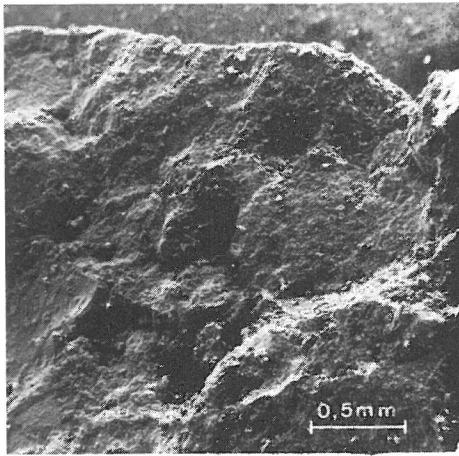
barkeit zunächst grundsätzlich eine gleichartige Stellung einzuräumen. Ein klarer Vorteil des ersteren scheint aber der unmittelbare Zugriff zum Verwitterungsgeschehen zu sein. Dies ist wohl auch der Hauptgrund dafür, daß dieser sich gleich jenen zwar mit dritten Parametern hinreichend korrelieren läßt, jedoch nicht ohne weiteres mit den beiden genannten Verhältnissen selbst. Das kommt in einer merklichen Reduktion des Meßwertkollektivs (vgl. z. B. Abb. 31) zum Ausdruck; denn neben den für Proben von geringer Porosität ungenauen Verhältniszahlen erweisen sich ja Werte von Proben mit hochdispersen Anteilen als "anomal", weshalb eine Eliminierung erforderlich wird. Demgegenüber spielt beim Quotienten  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  die disperse Komponente offenbar eine ähnliche Rolle wie beim Faktor  $p_1$ , so daß entsprechende Werte in Kombination mit jenem kaum Abweichungen von der Grundtendenz zeigen. Ferner scheint bemerkenswert, daß die im Falle der Abb. 31, 32 und 33 gezeigten Unterschiede der Korrelation mit den verschiedenen intensiven Varianten des Kristallisationsversuchs bei  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  einen regelrechten Ausgleich erfahren (vgl. Abb. 36). Dieses Verhalten dürfte auf einer Verwandtschaft zwischen den beiden Parametern beruhen.

An der Streuung der Meßwerte im Rahmen der Beziehungen zwischen  $p_1$ , den einzelnen Porenraumverhältnissen und dem Quotienten  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  (vgl. die Abb. 11, 31, 33, 34 und 37) läßt sich u. a. erkennen, daß solche Merkmale dem "allgemeinen Ansatz" für das Verwitterungsverhalten eines Materials offenbar in unterschiedlicher Weise nahekommen. Vielleicht kann man das damit erklären, daß jeder einzelne davon eine andere Facette jenes komplexen Begriffs besser zu beschreiben imstande ist.

### 3.3.3 Elementverteilungsanalyse von Verwitterungsprofilen

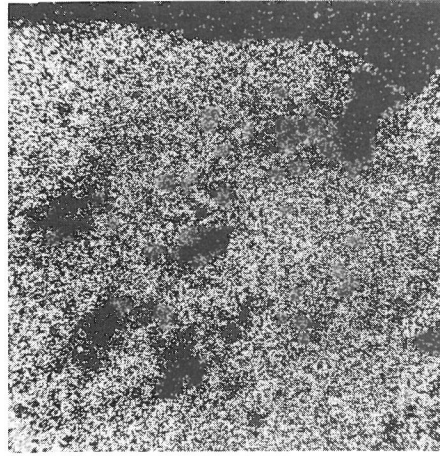
Die energiedispersive Röntgenmikroanalyse (vgl. Abschnitt 2.2.2) ist für das behandelte Gebiet keineswegs so universell anwendbar, wie man das aus manchen neueren Arbeiten entnehmen könnte. Trotzdem ist hier dem Materialprüfer ein Verfahren an die Hand gegeben, das sich mitunter als recht hilfreich erweist. Allerdings nur in einigen Fällen haben sich aussagekräftige Verteilungsbilder des vor allem interessierenden Schwefels gewinnen lassen, deren Deutung von Nutzen ist. Einige für die Problematik typische Beispiele werden im folgenden gegeben: Dichte Kalksteine zeigen am Bauwerk und bei künstlicher Bewitterung oft eine nur sehr dünne Sulfatschicht, die im Zuge der Präparation einer quer dazu verlaufenden Bruchfläche auch noch absplittern kann. In hochporösen Sandsteinen ist die entsprechende Eindringtiefe zwar erheblich, ein "Schwefelprofil" aber häufig nur schwer erkennbar, weil sich strukturierte bzw. differenzierte Bereiche anhand der fotografischen Erfassung einer Flächenverteilung sowie durch Linien- oder Punktanalysen nicht immer sichtbar machen lassen. Derartige Probleme haben dazu geführt, daß nur wenige geeignete Belegstücke von dem hier untersuchten Probematerial zu erhalten gewesen sind. Mit Hilfe dieser Methode läßt sich nachweisen, daß die beobachtete partielle Sulfatisierung des Ihrler Kalksteins an gefügebefindige Wege für den Lösungstransport gebunden ist. Andernfalls würde wohl nicht eine aureolenartige Schwefelanreicherung um die in Bild 38 erkennbaren Hohlräume zu finden sein. Bei stärkerer Vergrößerung zeigt sich außerdem, daß - vermutlich



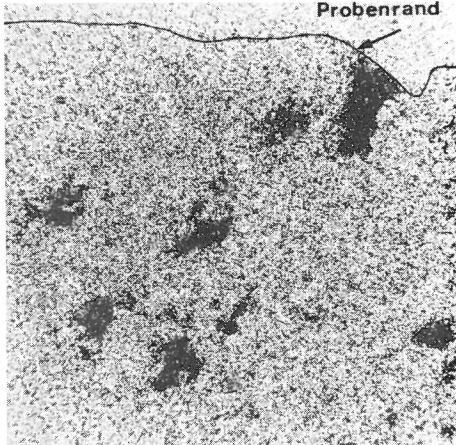


Sekundärelektronenbild

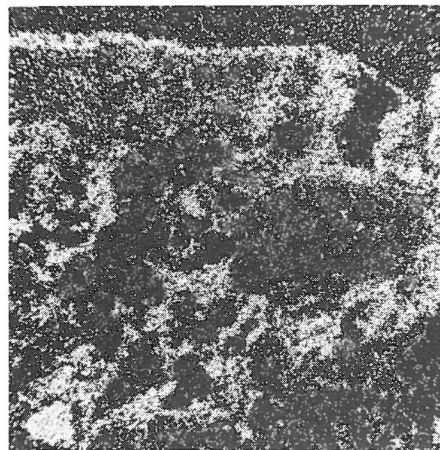
Probenrand



Ca-K $\alpha$ -Verteilung



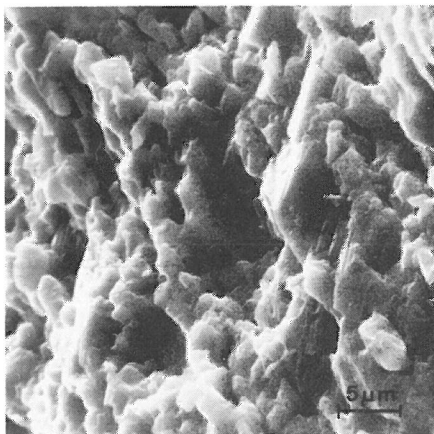
Summenintensität aller Elemente



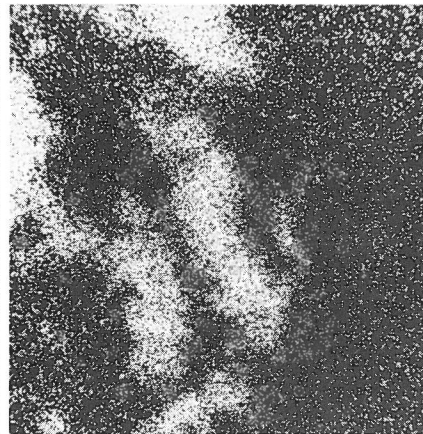
S-K $\alpha$ -Verteilung

Abb. 38

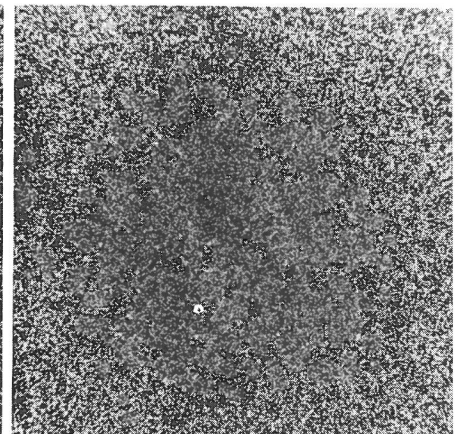
Energiedispersive Röntgenmikroanalyse: Der vom Regensburger Dom stammende Kalkstein ist teilweise in Sulfat überführt worden. Offensichtlich hat dieser Prozeß auf dem Wege einer Lösungswanderung über den offenen Porenraum stattgefunden.



Sekundärelektronenbild



S-K $\alpha$ -Verteilung



Ca-K $\alpha$ -Verteilung

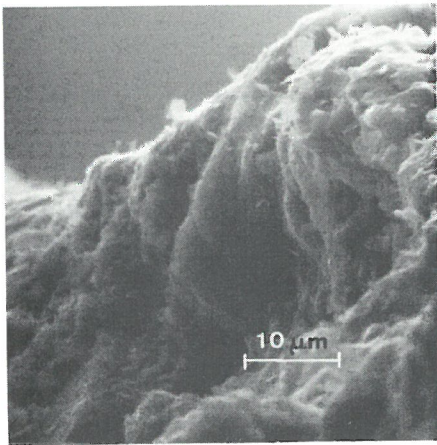
Abb. 39

Energiedispersive Röntgenmikroanalyse: Material wie in Abb. 38; partielle Umwandlung von Kalkstein in Sulfat

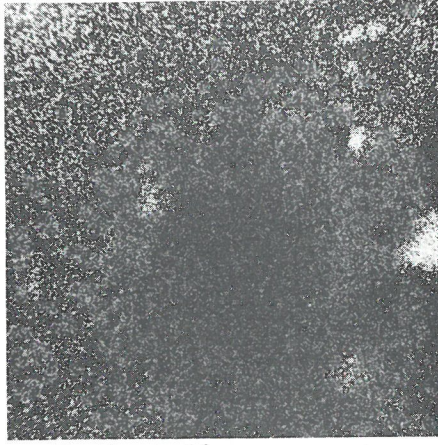
aus demselben Grunde - von der Umwandlung nur ein Teil der Calcit-Kristallindividuen erfaßt worden ist (Abb. 39).

Während die Verteilungsanalyse bei Kalksteinen nicht immer gerade neue Erkenntnisse zu liefern vermag, eignet sich das Verfahren bei Sandstein durchaus gut zur Identifikation von umgewandelten Bestandteilen sowie zur Lokalisierung von

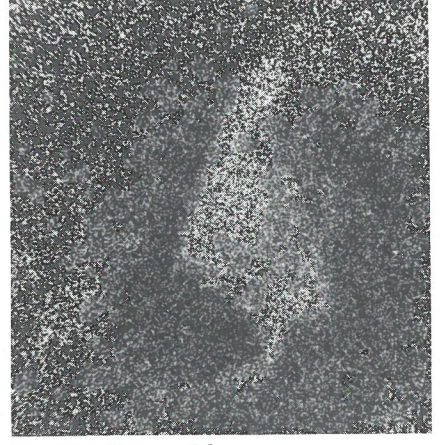




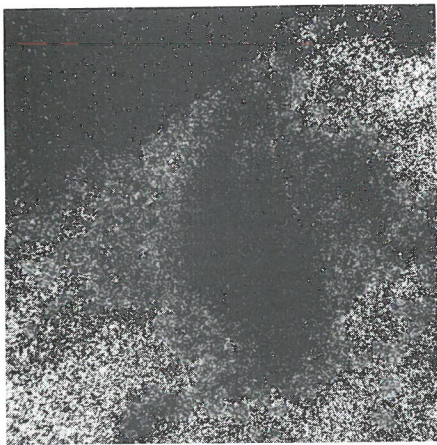
Sekundärelektronenbild



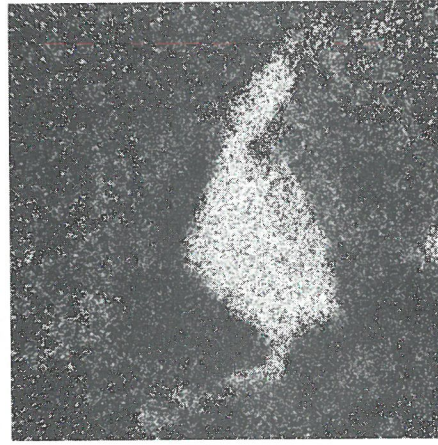
Ca-K $\alpha$ -Verteilung



Mg-K $\alpha$ -Verteilung

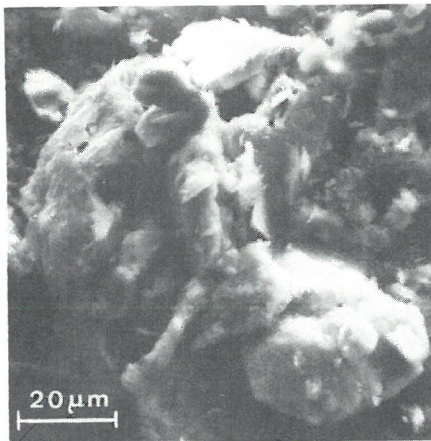


Si-K $\alpha$ -Verteilung



S-K $\alpha$ -Verteilung

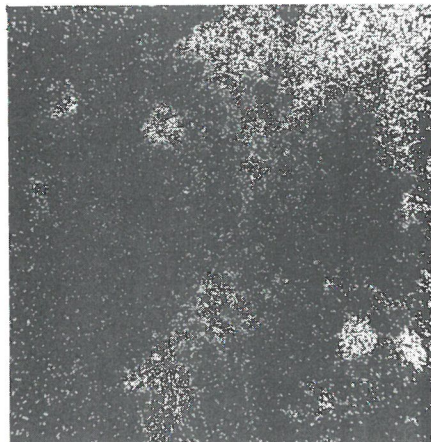
Abb. 40  
Energiedispersive Röntgen-  
mikroanalyse: Magnesium-  
und Calciumsulfat in den  
regengeschützten Oberflä-  
chenpartien des Sandsteins;  
Fiale am Hauptturm des  
Freiburger Münsters



Sekundärelektronenbild



Ca-K $\alpha$ -Verteilung



Si-K $\alpha$ -Verteilung



S-K $\alpha$ -Verteilung

Abb. 41  
Energiedispersive Röntgen-  
mikroanalyse: Gipsaggregate  
in der Oberschicht eines  
Sandsteins; Hohe Bastei der  
Veste Coburg



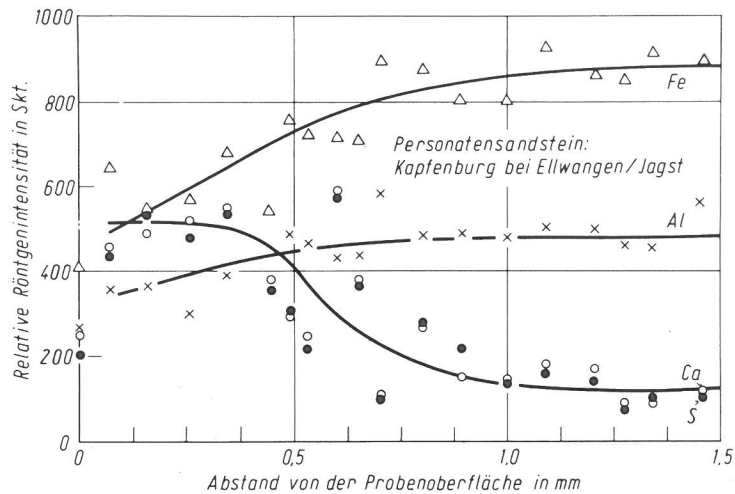


Abb. 42  
Energiedispersive Röntgenmikroanalyse: Tiefenprofil der mit Gips angereicherten Oberflächenschicht eines eisenschüssigen Sandsteins. Das Auffüllen der Poren mit Calciumsulfat täuscht ein scheinbares Absinken der Fe- und Al-Intensitäten vor.

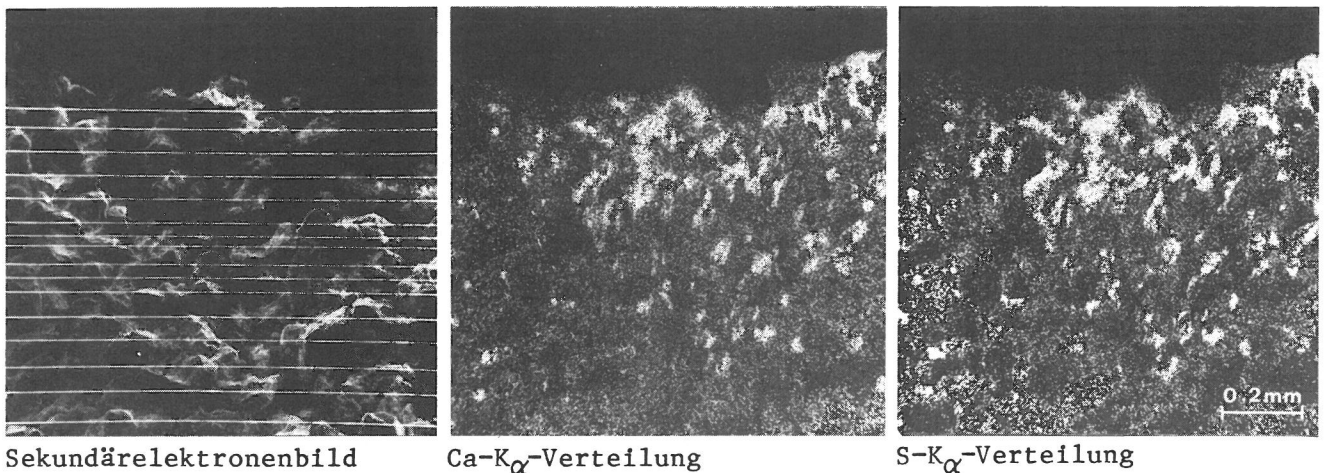


Abb. 43

Energiedispersive Röntgenmikroanalyse: Zu dem in Abb. 42 gezeigten Tiefenprofil gehörige Elementverteilungsbilder eines Sandsteins (Die dort dargestellten relativen Intensitäten sind längs des im Sekundärelektronenbild erkennbaren Linienmusters gemessen worden).

Ausscheidungsprodukten fremder Herkunft. Im hier behandelten Fall macht die Kombination der Elemente (Abb. 40) glaubhaft, daß neben Calciumsulfat im Tennenbacher Sandstein auch lokale Konzentrationen von Magnesiumsulfat vorhanden sein können, deren Herkunft sich auf diesem Wege indessen nicht klären läßt. Abb. 41 gestattet u. a. eine scharfe visuelle Trennung der Gipsaggregate von kleineren Quarzkörnern in der Oberflächenschicht eines Sandsteinblocks. In eisenschüssigem Personatensandstein aus einer Toreinfahrt lassen sich fleckenartige Gipsanreicherungen (Abb. 42) beobachten, deren Platznahme mit Transportvorgängen verknüpft ist, wofür das Zusammengehen von Calcium und Schwefel Hinweise liefert, wie übrigens auch in der Elementverteilung (Abb. 43) zum Ausdruck kommt. So stellt diese Analyseverfahren zwar ein brauchbares Hilfsmittel zum Sichtbarmachen von örtlichen Anreicherungen dar (vgl. auch Abschn. 5 von (145)), ist jedoch eher von phänomenologisch-deskriptivem Charakter.

An dieser Stelle sollte man der Vollständigkeit halber auf den von F. M e l l o M e n d e s et al. beschriebenen, vielleicht nützlichen "mikropetrographischen

Index" hinweisen, der sowohl Modalanalyse als auch Mikrorißkonzentration einbezieht und bisher im Fall einiger magmatischer und metamorpher Gesteine angewendet worden ist (139).

#### 3.3.4 Weniger signifikante Merkmale

Während die meisten Verfahren zu Erfolgen geführt haben, sind aber auch regelrechte "Negativposten" zu verbuchen: Wenig Greifbares lieferten die Ergebnisse der Frosttauwechsel-Versuche, von denen zu erwarten gewesen wäre, daß wenigstens ein Vergleich der Druckfestigkeit der wassergesättigten Probekörper gegenüber dem mit 25 Zyklen beaufschlagten Material Hinweise auf dessen Verwitterungsanfälligkeit gegeben hätte. Hier zeigten sich jedoch in gleichem Maße ungünstige Verhältnisse, wie sie S. G r u n e r t (72) beschrieb, bei dem "die für Druckfestigkeit charakteristische hohe Streuung eindeutige Abhängigkeiten" überdeckt hatte. Auch Untersuchungen an Vormauerziegeln blieben trotz jeweils 100 Frosttauwechseln ähnlich erfolglos (156). Indes ist auf die Schwierigkeit, mechanische Kennwerte von Ziegeln mit ihrer Verwitterungsbeständigkeit in Beziehung zu bringen, schon früher hingewiesen worden (137), wofür in der Regel die große Streuung der Festigkeitswerte verantwortlich sein soll. Es scheint aber eher, daß man mit dem Versuch, hier eine einfache Relation nachzuweisen, einen ähnlichen Fehler begeht wie E. M ü l l e r (141) hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Druckfestigkeit und Dichte (vgl. Abschnitt 3.2). Die eigene Erfahrung mit Mauerziegeln, die aus der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts stammen, zeigt denn auch, daß das nicht die einzige Ursache für Fehlschläge sein kann. Einige dieser Ziegel haben sich nämlich trotz ihrer hohen Festigkeit als sehr wenig widerstandsfähig gegen Frostbeanspruchung erwiesen. Der Grund dafür dürfte vor allem in der Inhomogenität der Steine als Folge einer unzureichenden Aufbereitung der Rohstoffe zu suchen sein.

Als ebenso unzweckmäßig im Sinne einer Beurteilungsgrundlage erweist sich die Ermittlung von Phasenverhältnissen wie etwa Quarz/Feldspat, Feldspat/Tonminerale, Calcit/Dolomit, Sulfat/Carbonat oder Sulfit/Sulfat. Auch wenn man im Einzelfall die lokale Bedeutung der jeweiligen Minerale in Betracht zieht, so ist eine Verknüpfung derart erhaltener Kennwerte mit anderen nach bisherigen Befunden nur wenig aussichtsreich. Das ungünstige Abschneiden solcher Kombinationen darf jedoch nicht den Blick dafür verschließen, daß einige der in den vorigen Abschnitten erwähnten Korrelationsbeispiele durchaus für einen Erfolg zukünftiger Schritte in die gewiesene Richtung sprechen.

Im Hinblick auf die künstliche Bewitterung muß bekanntermaßen berücksichtigt werden, daß selbst bei sonst gleichen klimatischen Bedingungen der aktuelle Feuchtigkeitsgehalt eines jeden Gesteins anders ist, weil er u. a. von Porengefüge und Grenzflächenphänomenen beeinflusst wird. Eine Simulation kann ohnehin den "natürlichen" Verlauf des Verwitterungsgeschehens nicht ersetzen. Auch ein recht flexibles Bewitterungsverfahren wie das in der Bundesanstalt entwickelte (vgl. Abschnitt 2.5.3) kommt ohne grobe Vereinfachungen nicht aus, auch wenn es mit wechselndem Feuchtigkeitsangebot arbeitet. Wird - inwieweit das auch immer

gerechtfertigt sein mag - die Korrelierbarkeit irgendeines, am "frischen" Gestein mit dem Kristallisationsversuch ermittelten Maßstabsparameters für die Abschätzung des Verwitterungsverhaltens herangezogen, so verfügt man jedenfalls über eine Art objektive Beurteilungsgrundlage. Während viele der bisher behandelten Einzelkennwerte wenigstens teilweise Ansätze hierfür liefern, ist das Bewitterungsergebnis bei den anderen Simulationsmethoden nicht immer hinreichend zu quantifizieren. Zwar läßt sich beispielsweise die Veränderung der offenen Porosität, der spezifischen Oberfläche, der lokalen Schwefelverteilung oder aber ein Gefälle der mechanischen Festigkeit senkrecht zur Materialoberfläche feststellen. Allein das sagt wenig über die voraussichtliche Verwitterungsbeständigkeit aus!

Zur Kontrolle der verschiedenen Verwitterungsstadien eines Werksteins ist innerhalb des gegebenen experimentellen Rahmens die spezifische Luftpermeabilität  $D_s$  als ein Kriterium für den Umsetzungsfortschritt in  $SO_2$ -Atmosphäre bei wechselnder Luftfeuchte gewählt worden. Die mantelseitig abgedichteten und in den Zwischenzeiten im Exsikkator gelagerten Probezylinder ( $d = 50$  mm,  $h = 50$  mm) werden ohne weitere Behandlung dem in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Verfahren unterworfen. Dabei bleiben die am Bauwerk gelegentlich auftretende Auslaugung oder der Frost unberücksichtigt. Will man einen derartigen Porenparameter für die Charakterisierung verschiedener Verwitterungsstadien an ein und demselben Material heranziehen, so muß durch Vorversuche erst einmal sichergestellt sein, daß sich das Gefüge eines Gesteins überhaupt "meßbar" verändert. Als eine wertvolle Orientierungshilfe hat sich hierfür die Röntgenmikroanalyse erwiesen. Eine Grundvoraussetzung für die erwarteten Reaktionen mit Schwefeloxiden wäre die Anwesenheit wenigstens geringer Anteile an Carbonat. Schließlich dürfen die Proben auch nicht bröckelig sein, d. h. der natürliche Materialzusammenhalt muß eine Entnahme von einwandfreien Bohrkernen gestatten. Die Anzahl der für diese Messungen vorgesehenen Proben schränkt sich natürlicherweise von selbst ein. Einmal entfallen alle dichten Kalksteine. Zum anderen zeigen hochporöse Sandsteine erwartungsgemäß keine merkliche Veränderung der Luftpermeabilität. Demgegenüber erniedrigten sich die Meßwerte für die verbliebenen Kalk- und Sandsteine in mehr oder weniger starkem Maße, wie es beispielsweise auch von Y. E f e s (62) an verwitterten Werksteinen des Kölner Doms nachgewiesen wurde. Man könnte annehmen, daß die in einer absinkenden Permeabilität zum Ausdruck kommende Verengung der Poren die Entstehung von Widerlagern begünstigt, die die Wirkung gefrierenden Wassers und sprengender Salze überhaupt erst möglich macht. Für ein Ansteigen des Meßwerts dagegen - etwa durch eine solche Gefügezerstörung bewirkt - gibt es bei den noch für die Untersuchung verbliebenen restlichen Gesteinen, die nur etwa ein Viertel der ursprünglichen Probenanzahl ausmachen, keinen Hinweis.

Wenig erfolgreich ist der Versuch gewesen, wie an Putzmörteln die im Zuge der  $SO_2$ -Bewitterung entstandenen "Profile der mechanischen Festigkeit" mit Hilfe des Oberflächenverschleißes (vgl. Abschnitt 2.4.4) zu erfassen, oder diese gar einander gegenüberzustellen (98). Nur in wenigen Fällen läßt sich eine derartige zonare Abfolge durch Lokalisierung des Schwefelanteils im Rasterelektronenmikroskop aufzeigen. Gar Konzentrationsgefälle sichtbar zu machen, ist ungleich schwieriger. Zu bedenken ist außerdem, daß ein verhältnismäßig dichter Kalkstein

nur in einer sehr dünnen Oberflächenschicht ohne nennenswerte Schädigung der Substanz verändert wird, während ein Sandstein mit wenig Carbonat am Kontakt zwischen den Gefügekörnern u. U. eine tiefgreifende Zerstörung erleidet. So darf man fast nur in Ausnahmefällen eine Proportionalität zwischen dem Kalkgehalt und dem Resultat des Schwefeloxid-Angriffs erwarten. Das ist es aber, was H o n e y b o r n e und H a r r i s (99) damit ausgedrückt haben, daß hierbei "chemische und mineralogische Zusammensetzung keine Rolle spielen".

Zu weiteren Schwierigkeiten gehört, daß die während des Bewitterungsversuchs entstehende Schwefelsäure bei kalkarmen oder gar kalkfreien Sandsteinen nach einiger Zeit nicht mehr vollständig gebunden wird. In situ geschieht das beispielsweise durch Transport in den benachbarten Werkstein, den Mörtel oder auch den aufgelagerten Staub und Ruß. Der Verwitterungsfortschritt hängt aber schließlich nicht nur von der Sulfatentstehung, sondern hauptsächlich auch von der Wirkung gefrierenden Wassers innerhalb des durch Porenverengung veränderten Gefüges ab. Mit der bisher üblichen Frostprüfung nach DIN 52 104 kann dies nur unzureichend nachgeahmt werden. Während selbst bei der künstlichen Bewitterung eine Sulfatanreicherung in der Oberflächenschicht gegenüber dem Kern stattfindet, ist beim derzeitigen Normversuch eher mit einer in diesem Sinne gleichmäßigen Verteilung zu rechnen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Gerade solch ein Phänomen dürfte aber dazu führen, daß das Aussehen der im Labor erhaltenen Schadensbilder von dem am Bauwerk abweicht. Allerdings können mit der künstlichen Bewitterung und dem Frostversuch das tatsächliche Materialverhalten wohl ebensowenig nachgeahmt werden, wenn man diese apparativ zu kombinieren imstande wäre.

Werden außerdem die unterschiedlichen Erscheinungsformen der in praxi anzutreffenden Schäden berücksichtigt, steht außer Frage, daß hierfür vermutlich mehr als nur ein Faktor verantwortlich ist, so daß letztlich auch Zweifel an der vollkommenen Erfassbarkeit der Phänomene anhand einer Simulationsmethode erlaubt sein müssen. Für das erwähnte Bewitterungsverfahren liegen demnach noch keine ausreichenden Erfahrungen vor, so daß dessen Erprobung weitere Anstrengungen erforderlich macht. Das hängt ebenso damit zusammen, daß hierbei weder die Frosteinwirkung noch die Auslaugungsvorgänge infolge Regenfall nachgeahmt werden können, wie schon experimentell versucht worden ist (98). Vor allem aber muß man die Möglichkeiten der quantitativen Erfassung des Bewitterungsfortschritts noch genauer untersuchen.

Auch die in den vorstehenden Abschnitten beschriebenen Resultate mit positiver "Bilanz" sind teilweise noch unvollständig und demzufolge weit davon entfernt, im Sinn einer statistisch fundierten Interpretation behandelt werden zu können, wie es etwa J. H. G r i f f i t h (71) für den Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften und der Wasseraufnahme verschiedenartiger Gesteine gelungen ist.



#### 4. Schlußfolgerung und Ausblick

Für jede Art von Untersuchung des Verwitterungsverhaltens stellt sich die Frage, welche Parameter bei einer Simulation zweckmäßigerweise zu berücksichtigen sind und welchen Aussagewert die betreffenden Messungen haben. Wenn es Ziel ist, eine optimale Vergleichbarkeit der Ergebnisse einer Labormethode mit dem Befund am Bauwerk zu erreichen, wird die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Verfahren in der Regel jedoch überfordert, weil zahlreiche unkontrollierbare Nebeneinflüsse das Resultat verfälschen. Denn eine allgemein verbindliche Beurteilung der ablaufenden Prozesse ist nicht zuletzt deshalb mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, weil der geschwindigkeitsbestimmende Schritt von Fall zu Fall auf anderen Ursachen beruhen kann und die Hauptfaktoren übrigens je nach Autor von unterschiedlichem Gewicht sein sollen. Faßt man den als "Motor" für nahezu jede Verwitterungsart verantwortlichen Feuchtigkeitstransport ins Auge, läßt sich - auch ohne zusätzliche Einwirkung von Niederschlag - bei sonst gleichen klimatischen Verhältnissen in jedem einzelnen Material eine recht unterschiedliche örtliche Feuchtigkeitsverteilung feststellen. Dafür kommen als Ursachen vor allem die Geometrie, das Porengefüge einschließlich der Grenzflächenphänomene sowie die Wärmeleitfähigkeit in Frage. Auch daß man nicht einfach den Gehalt an Calciumcarbonat in einem Gestein für seine Verwitterbarkeit in Industrie- und Siedlungsgebieten verantwortlich machen kann, sondern dessen lokale Verteilung und Dispersität in Betracht ziehen muß, sollte keiner weiteren Erörterung bedürfen: So verwittert Muschelkalk ja häufig nur unwesentlich, während etwa Sandstein, bei dem ein geringfügiger Kalkanteil das Kontaktbindemittel zwischen den Gefügekörnern bildet, recht empfindlich sein kann.

Schwer abzuschätzen ist weiterhin, welchen Beitrag zum Verwitterungsgeschehen die thermische Belastung der sonnenbeschienenen Seite eines Bauwerks etwa in Verbindung mit der Schwärzung durch Ruß liefert. Hierher gehört ebenso, daß urspränglich kalk- bzw. gipsfreie Bausteine nach entsprechenden Transportvorgängen durchaus dem "Rauchgas"-Angriff unterliegen können. Will man diese Art der Beanspruchung aber nachvollziehen, muß vor einer SO<sub>2</sub>-Behandlung erst ein entsprechender Kalkanteil auf künstlichem Wege in das Material eingebracht worden sein. Dabei sind allerdings weder dessen gleichmäßige Verteilung noch ein vergleichbares Reaktionsvermögen in Baustoffen vollkommen unterschiedlichen Gefüges zu erwarten. Vielmehr würde man mit jeder weiteren scheinbaren Anpassung an die "natürlichen" Bedingungen die technische Durchführbarkeit solch einer "Allround"-Methode gefährden. Darüber hinaus hätten unvorhergesehene Sekundäreffekte eine Verzerrung der tatsächlichen Verhältnisse zur Folge. Wenn man auch noch die verschiedenartigen Belastungen nach Intensität und Zeitdauer ihrer Einwirkung variieren wollte, würde das sehr bald den vertretbaren experimentellen Rahmen sprengen. Insbesondere bei der Anwendung von Methoden, die auf zyklischen Beanspruchungen beruhen, ist also dafür zu sorgen, daß eine vermeintliche Praxisnähe nicht etwa zu Lasten der beabsichtigten Aussage geht. Auch hat man sich damit abzufinden, daß eine Simulation den vom Mikroklima geprägten "natürlichen" Ablauf sowieso nie vollkommen ersetzen kann. Vom Wunschgedanken einer allumfassenden Simulierbarkeit des an jeder einzelnen Stelle des Bauwerks spezifischen Materialverhaltens bleibt jedenfalls nicht viel übrig. Demnach wäre die Frage nach der "Dauerhaftigkeit" eines Werksteins eigentlich falsch formuliert und

müßte wohl beispielsweise eher heißen: Ist Baustoff B den Baustoffen A und C vorzuziehen?

Indes ist es wenigstens manchmal gelungen, Verknüpfungen zwischen einfachen Kennwerten teilweise völlig unterschiedlicher Natur nachzuweisen, ohne dabei gleich auf ein anspruchsvolleres Instrumentarium zurückgreifen zu müssen. Es drängt sich wie von selbst die Frage auf, welche Merkmalkombinationen sich am besten für die Einschätzung des voraussichtlichen Verhaltens nutzbar machen lassen. Eine klare Antwort hierauf wird aber erst möglich sein, wenn man über das eben erreichte Stadium einer Bestandsaufnahme hinausgekommen ist und wesentlich besser als bisher gelernt hat, die physikalischen Zusammenhänge zu deuten. Mithin weist das vorliegende Arbeitsgebiet immer noch einen Zustand auf, in dem eine Erkenntnis meist erst auf die nächstgrößere Unkenntnis aufmerksam macht.

In einigen Fällen reicht das gewonnene Datenmaterial - wie auch das aus der nicht gerade ergiebigen Literatur - von der Quantität her nicht aus, um Gesetzmäßigkeiten zwischen verschiedenen Eigenschaften oder Merkmalen sichtbar zu machen. Ebenso können nach bisherigen Erfahrungen eventuell vorhandene Tendenzen durch einzelne anomale Meßwerte nachhaltig beeinträchtigt werden. Solange sich diese aber nicht anhand einwandfreier Kriterien charakterisieren lassen, hieße das, die erhaltenen Ergebnisse mehr oder weniger zu mißdeuten. So wird, falls überhaupt irgendeine funktionelle Abhängigkeit besteht, in aller Regel lediglich eine noch größere Anzahl Meßwerte weiterhelfen. Vorerst wäre es aber nützlicher, aus den möglichen stochastischen Zusammenhängen die interessantesten herauszusuchen, anstatt den Grad der Zuverlässigkeit von Beziehungen aller Art bestimmen zu wollen. Denn der experimentell arbeitende Baustoffprüfer wird letzten Endes gezwungen sein, ein möglichst einfaches Prüfkonzept anzuwenden, das nur die allerwichtigsten Parameter bzw. Beanspruchungsarten einbezieht, die möglichst der Forderung nach jenem "allgemeinen Ansatz" für das Verwitterungsverhalten gerecht werden.

Da im Klima Mittel- und Nordeuropas vor allem Frost- und Salzsprengung als relevante physikalische Vorgänge in Betracht kommen, ist für die Verwitterung eine Belastung des Gefüges bzw. der Porenwandungen infolge Volumenänderung bei Kristallisation oder Hydratation von großer Bedeutung. Auf der Suche nach einem zweckdienlichen Verfahren zu deren Nachahmung hat sich vor allen anderen der klassische Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat in Verbindung mit einem neuen Auswertverfahren als brauchbar erwiesen. Neben den am Bauwerk entstehenden Profilen berücksichtigt er die Ortsabhängigkeit der mechanischen Beanspruchung zwischen Kern und Oberfläche eines Werkstein-Probekörpers. Denn das Baustoffgefüge wird - wenn man von dessen künstlicher Veränderung durch konservatorische Maßnahmen einmal absieht - in Oberflächennähe ständig von Feuchtigkeits- und Lösungstransport sowie Frostangriff geprägt. Zwar haben britische Forscher die Kristallisation von Salzen im Porenraum als Hauptursache für den Steinerfall in Britannien angesehen und damit begründet, warum der Kristallisationsversuch ihrer Meinung nach immer noch die beste Einzelprüfung zur Beurteilung der Beanspruchung eines Gesteins darstellt (180). Im Gegensatz zu dieser restriktiven Deutung läßt sich das porensprenghende Verhalten des Natriumsulfats nach eigener Ansicht modellhaft aber auch auf die Frosteinwirkung übertragen.

Die Varianten des Kristallisationsversuchs mit erhöhter Natriumsulfatkonzentration zeichnen sich vor anderen Schnellmethoden - besonders gegenüber der in der gegenwärtig gültigen Fassung von DIN 52 104 (51) beschriebenen Frostprüfung - dadurch aus, daß sie weit eher jenem Spannungsgefälle in der Oberflächenschicht eines Materials am Bauwerk Rechnung tragen. Die Gemeinsamkeiten erschöpfen sich jedoch keineswegs in dieser rein mechanischen Einwirkung auf das Baustoffgefüge. Die Sulfatverwitterung durch Reaktion der Kalkkomponente mit den atmosphärischen Luftverunreinigungen wird vielmehr im Zuge der ablaufenden Stoffwanderungsvorgänge wenigstens zum Teil nachgeahmt, wenn das auch wesentlich von der jeweiligen Dispersität des Carbonats oder dessen Nachschub von außerhalb abhängen dürfte. Bei den Versuchsvarianten mit "schonender" Beanspruchung, die den Verhältnissen am Bauwerk vielleicht näherkommen, scheint man ihre vermeintliche Praxisnähe durch länger andauernde Prozeduren mit geringer Sulfatkonzentration nur mit dem Nachteil des verstärkten Einflusses von Nebenwirkungen erkaufen zu können. In Form des Maßstabfaktors  $p_1$  der WEIBULL-Verteilung läßt sich demnach jetzt der Verlauf des Masseverlustes von Gesteinen, sofern diese während des Versuchs gleichmäßig absanden, anhand von zwei Parametern quantifizieren (6). Da bisher offensichtlich der für jenen "allgemeinen Ansatz" erforderliche Standard fehlt, an dem man die Eignung eines Verfahrens messen könnte, wird - über die Berechtigung eines solchen Vorgehens mag man streiten - als Qualitätskriterium zunächst die Anzahl von Kennwerten angesehen, mit der der betreffende in eine vernünftige Relation zu bringen ist. In dieser Hinsicht nimmt der Kristallisationsversuch unter den herangezogenen Verfahren eine besondere Stellung ein, und zwar nicht zuletzt deshalb, weil er einige der wenigen Prozeduren darstellt, die den unmittelbaren Zugang zum Verwitterungsverhalten eines Materials gestatten. So scheint er zu den universellsten und damit aussichtsreichsten zu gehören und auch zuverlässige Aussagen über das Materialverhalten von Werksteinen sedimentärer Herkunft zu liefern. Da aber dem entsprechenden Faktor  $p_1$  der WEIBULL-Verteilung keine alleinseligmachende Rolle zugeschrieben werden darf, ist darüber hinaus nach einer zweckmäßigen Auswahl von weiteren Eigenschaften bzw. Merkmalen zu fahnden, die die Verwitterbarkeit kennzeichnen und sich in einfacher Weise untereinander in Beziehung bringen lassen. Gefragt wird also nach einer beschränkten Anzahl von geeigneten Prüfverfahren, auch wenn deren Ergebnisse erst in ihrer Kombination eine umfassende Charakterisierung gestatten. Dabei sollen die für ein Gestein erhaltenen Daten möglichst mit mehreren anderen Merkmalen desselben im Zusammenhang stehen. Trotz guter Aussichten müßte man aber nach wie vor zur Vorsicht raten und klarstellen, daß sich der derzeitige Wissensstand noch keinesfalls drastisch von dem unterscheidet, den W. Bolton Ende des vergangenen Jahrhunderts für eine breite Palette von Untersuchungen beschreibt, die von porenraumbezogenen über mechanische Parameter bis zum Kristallisationsversuch reicht (19).

Die Arbeit hat im Zeichen des Bemühens gestanden, von der rein beschreibenden Bewertung loszukommen und an deren Statt ausschließlich quantitative Kriterien nutzbar zu machen. Das scheint umso eher verständlich, wenn man bedenkt, wie sich manche Petrografen in einer pedantischen Auflistung überwiegend deskriptiver Aussagen geradezu verlieren. Auch wird hier ganz bewußt von einer Forderung nach strikter Universalität der Bestimmungsverfahren Abstand genommen, indem man beispielsweise Ergebnisse für Proben von offenkundig anomalem Verhalten

nicht vorbehaltlos in irgendwelche Zusammenhänge miteinbezieht. Ebenso muß streng unterschieden werden zwischen Beanspruchungsfortschritt im Verlauf der einzelnen Verwitterungsstadien, wie er u. a. im Fall der sogenannten gestörten Kornbindung seinen Ausdruck findet, und dem Vergleich von verschiedenen Gesteinen in "frischem" bzw. nur geringfügig verändertem Erhaltungszustand untereinander. Bei den meisten der hier vorgestellten stochastischen Beziehungen steht eine zuverlässige Deutung bisher aus. Dazu langt das gewonnene Datenmaterial in der Regel nicht, so daß man es vorerst mit der einfachen Aneinanderreihung von Beobachtungen bewenden lassen muß. Aber auch der Mangel an "brauchbaren" Literaturdaten hat dazu beigetragen, daß es noch nicht möglich ist, ein geschlossenes Bild der aufgeworfenen Problematik zu skizzieren. Ebenso würde es müßig erscheinen, schon zum gegenwärtigen Zeitpunkt an den groben Linien "Kosmetik zu treiben". Die Konsequenzen, die sich aus den bisher teilweise unbekanntem Beziehungen zwischen sehr verschiedenartigen Eigenschaften bzw. Merkmalen ergeben, werden zur Zeit weder voll und ganz übersehen noch angemessen eingeschätzt. Es ist daher vorzuziehen, überhaupt erst einmal einen gangbaren Weg zu finden, der trotz der Parametervielfalt auf einen einfachen Nenner zurückführen hilft. Anscheinend sind nützliche Ergebnisse bisher eben gerade deswegen ausgeblieben, weil es an einer Reduktion des Problems auf seine wesentlichen Faktoren gefehlt hat. Bei dem Bemühen, die verschiedenen Kennwerte miteinander in Zusammenhang zu bringen (vgl. (146), (147), (148)), muß man aber berücksichtigen, daß manche der Kombinationen nicht allein das Ergebnis planmäßiger Suche, sondern eher "zufällig" zustande gekommen sind. So wird sich manche Beziehung vermutlich noch als unhaltbar erweisen, auch wenn ihr ein stochastischer Zusammenhang zugrundeliegen sollte. Überdies treten Schwierigkeiten auf, die sich einer Interpretation in den Weg stellen. So kann man porenraumbezogene Merkmale manchmal gleichzeitig mit einer mechanischen Eigenschaft korrelieren, ohne daß sich hierfür eine schlüssige Erklärung finden läßt. Als Beispiele sind hierfür zu nennen:

- Der für einen Feuchtigkeitstransport zur Verfügung stehende Porenraum,
- Verhältniszahlen, die den Füllungsgrad des Porenraums mit Wasser zu beschreiben gestatten und schließlich
- Merkmale, die Aussagen zur Dynamik des Kapillartransports liefern.

Obwohl es noch kein sicheres Konzept gibt, ist nach eigener Ansicht mit dem vorgestellten Datenmaterial ein Anfang gemacht, anhand dessen man vielleicht spätere Theorien einmal wird stützen können. Für die Suche nach geeigneten Auswahlkriterien im derzeitigen Stadium ist es daher eher von Interesse, die sich als "passend" erweisenden Korrelationen aufzuspüren, als nur diejenigen Parameterverknüpfungen auf Brauchbarkeit "hinzutrimmen", die zwar folgerichtig erscheinen, aber von vornherein keine ausgeprägten Beziehungen erkennen lassen. Ebenso sollte die Diskussion um die Genauigkeit der Meßmethoden zunächst einmal in den Hintergrund treten. Denn innerhalb des so abgesteckten Rahmens kann man eigentlich jetzt erst, d. h. unter Berücksichtigung der gefundenen Grundtendenzen, detailliertere und damit exaktere Beobachtungen über die Verhältnisse zwischen Gefüge und Verwitterungsneigung anstellen, wobei der Schwerpunkt naturgemäß auf "frischem" Gestein zu liegen hat.

Man sollte zunächst nach möglichst verschiedenartigen Merkmalen fahnden, die einen Beitrag in Richtung auf jenen "allgemeinen Ansatz" für das Verwitterungsverhalten zu liefern versprechen. An jedem neuen Material müßten dann neben weiteren insbesondere diejenigen Parameter ermittelt werden, die sich als aussichtsreich erwiesen haben. Erst durch Belegen der bereits festgestellten oder vermuteten Beziehungen mit möglichst zahlreichen Meßdaten würde eine Bewertung der unterschiedlichen Kennwerte überhaupt einen Sinn bekommen. Beim gegenwärtigen Stand der Dinge könnte es für die Beurteilung des voraussichtlichen Materialverhaltens außerdem zweckmäßig sein, eine Klassifikation anzustreben, wie sie etwa M. M a m i l l a n (131), M. L o n g u e t (129) und E. L e a r y (123) oder aber auch schon J. H i r s c h w a l d (91) in Form einer direkten Zuordnung zu unterschiedlichen Beständigkeitsklassen beschrieben bzw. angewendet haben. Als sicher gelten darf, daß eine Differenzierung der einzelnen Materialgruppen zweckmäßig oder sogar notwendig ist, d. h. man kann beispielsweise die an Kalkgesteinen erhaltenen Resultate nicht ohne weiteres auf Sandsteine übertragen. Im vorliegenden Fall reicht die Probenanzahl indessen nicht aus, um bei manchen Merkmalkombinationen materialspezifische Eigenheiten immer deutlich genug auszudrücken oder gar plausibel zu erklären. Zu den wenigen Ausnahmen hiervon gehören jedoch Beziehungen zwischen den einfachen Parametern des Porenraums und der Porengrößenverteilung. Die Gesamtheit der gefundenen stochastischen Zusammenhänge liefert zwar umfangreiches Datenmaterial im Sinne einer Bestandsaufnahme. Das ist allerdings erst dann in vollem Umfang nutzbar zu machen, wenn einmal die einzelnen Parameterkombinationen in ihrer funktionellen Abhängigkeit vollends verstanden werden, wie das etwa von F. M. P e l l e r i n (157) gefordert und in Ansätzen auch schon erreicht worden ist. Davon ist man zum gegenwärtigen Zeitpunkt weit entfernt. Noch viel Arbeit muß auf das Fernziel verwendet werden, die den eigentlichen Wirkungsmechanismus bestimmenden Anteile der betreffenden Kennwerte herauszufinden und somit zuverlässige Kriterien für die Einstufung der Baustoffe zu finden. Auf diesem Wege wird man eines Tages vielleicht eher Grundlagen für einen gezielten Steinersatz an erhaltenswerten Bauwerken und Skulpturen schaffen können, wodurch wiederum indirekt eine verlängerte Lebensdauer der Bausubstanz zu erwarten ist.

Aus den Untersuchungen geht hervor, daß es zum gegenwärtigen Zeitpunkt müßig wäre, ein "Patentrezept" zu fordern. Andererseits müßte man aber bei allem Vorbehalt doch wenigstens einige Anregungen geben. So sollte für Sedimentgesteine vorrangig der Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat herangezogen werden, auch wenn Reaktionen der Lösung mit einer Kalkkomponente zu befürchten sind; denn dessen Ergebnisse scheinen dem erwähnten "allgemeinen Ansatz" für das Verwitterungsverhalten noch immer am nächsten zu kommen. Zur vollständigeren Kennzeichnung dürften außerdem Sättigungswert, Wasserkapazität, relativer Imprägnierungsgrad, Porengrößenverteilung, Oberflächenverschleiß und Festigkeitsverhältnis  $\sigma_{u(w)}/\sigma_u$  sowie die zu den genannten Verhältniszahlen führenden Einzelmerkmale von Interesse sein. Weitere Anhaltspunkte würden sich mit Hilfe des Bewitterungsverfahrens in SO<sub>2</sub>-Atmosphäre bei wechselnder Luftfeuchte gewinnen lassen, wodurch man in erster Linie Aufschluß über die Reaktionsneigung kalkhaltiger Baustoffe mit dem Sulfat zu erwarten hätte.



Für die Bereitstellung von Mitteln für diese Aufgabe sind wir der Stiftung Volkswagenwerk, Hannover, verpflichtet. Frau M. K o r b a n i a k und Herr J. G ö t z e haben sich um die experimentelle Abwicklung des Untersuchungsprogramms besonders verdient gemacht. Dank für ihren Beitrag zu diesem Vorhaben gebührt auch den Herren Dr. G. S t r o m b u r g und G. Z e u m e r sowie den Mitarbeitern des Referats 7.23 "Rechentechnik und Datenverarbeitung" und des Laboratoriums 5.32 "Mikroanalyse von Oberflächen" der Bundesanstalt.



## 5. Literatur

- (1) Accardo, G.; Massa, S.; Rossi-Doria, P.; Sammuri, P.; Tabasso, M.: Artificial weathering of Carrara marble: relationships between the induced variations of some physical properties. in: The conservation of stone II. Preprints of the contributions to the Internat. Symp. on the Conservation of Stone, Bologna 27/10/ - 30/10/1981 (Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, No. 31); ed. by R. Rossi-Manaresi, Bologna: Centro per la Conservazione delle Sculture all'aperto 1981, part A, S. 243-273.
- (2) Albrecht, W.: Stuckgips und Putzgips, physikalisch-technologische Eigenschaften und ihre Prüfung. in: Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe D, No. 15, Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung 1953, S. 34-42.
- (3) Aleixandre Ferrandis, V.: La porosidad y su influencia sobre las propiedades técnicas de los productos cerámicos. Bol. Soc. Esp. Cerám. 10 (1971) No. 2, S. 163-191.
- (4) Ammar, C.; Gérard, R.: Etude de la résistance au gel des matériaux de construction et détermination de critères de réception de ces matériaux. Compte rendu d'étude et de recherche du Centre Scientifique et Technique de la Construction, No. 15, Bruxelles: 1972, 92 pp.
- (5) Ammar, C.; Gérard, R.: Relation entre la structure des pores et la résistance au gel des matériaux de construction. Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure and Properties of Materials, Prague 18/09/ - 21/09/1973, ed. by S. Modrý and M. Svata, Prague: Academia 1974, final report, part IV, vol. VI, F-105/F-113.
- (6) Anthor, D.; Niesel, K.: Der Verlauf der Masseänderung als Grundlage für die Auswertung des Kristallisationsversuchs. Bautenschutz u. Bausanierung 3 (1980) No. 2, S. 59-67 (Französ. Kurzfassung: Niesel, K.: L'évolution de la diminution de la masse comme base pour l'essai de cristallisation. UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06/ - 09/06/1978 (Report 3.5) 13 pp.).
- (7) D'Andrea, D. V.; Fischer, R. L.; Fogelson, D. E.: Prediction of compressive strength from other rock properties. Rept. of Inv. 6702, Washington D. C.: U. S. Dept. of the Interior; Bureau of Mines 1965, 23 pp.
- (8) Anon.: Die Druckfestigkeit und das spezifische Gewicht von Bruchsteinen. Dingler's polytechn. J. 246 (1882) S. 414-415.
- (9) Arndt, H.: Neues Prüfverfahren zur Ermittlung der kapillaren Wasseraufnahme und Feuchtigkeitsabgabe von Bau- und Dämmstoffen. Baustoffind. B 17 (1974) No. 4, S. 4-8.

- (10) ASTM C 62-80:  
Building brick (solid masonry units made from clay or shale).  
Ausgabe November 1980, 4 pp.
- (11) ASTM C 67-80a:  
Sampling and testing brick and structural clay tile. Ausgabe Mai 1980,  
9 pp.
- (11a) ASTM C 88-76:  
Soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate.  
Ausgabe September 1976, 6 pp.
- (12) ASTM C 448-64 (1972):  
Abrasion resistance of porcelain enamels. Ausgabe August 1964,  
Neuzulassung 1972, 8 pp.
- (13) ASTM E 140-79:  
Standard hardness conversion tables for metals. Relationship  
between Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, and  
Knoop hardness. Ausgabe Februar 1979, 16 pp.
- (14) Bauschinger, J.:  
Versuche über die Abnützbarkeit und Druckfestigkeit von Pflaster- und  
Schottermaterialien. Mitth. Mechan.-Techn. Lab. Königl. Techn. Hochsch.  
München 1884, No. 11, 35 pp.
- (15) Beeger, D.:  
Zur Sandsteinverwitterung am Großen Wendelstein im Schloß Hartenfels  
zu Torgau.  
Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol., Dresden 16 (1970) S. 9-22.
- (16) Bergmann, K.:  
Der Einfluß der Hohlraumverteilung in keramischen Erzeugnissen auf  
deren Frostbeständigkeit. Ziegelind. 9 (1956) No. 8, S. 253-262.
- (17) Böhme:  
Ueber die Abnützbarkeit der Cemente und verschiedener Mörtel aus den-  
selben. Mitth. Königl. techn. Versuchsanst. Berlin 5 (1887) S. 108-114.
- (18) Böhme:  
Untersuchungen von natürlichen Gesteinen auf Festigkeit, spezifisches  
Gewicht, Wasseraufnahme und Abnützbarkeit. Mitth. Königl. techn. Ver-  
suchsanst. Berlin 10 (1892) S. 188-189.
- (19) Bolton, W.:  
Die Prüfung klastischer Gesteine auf ihre Verwitterbarkeit. Dingler's  
polytechn. J. 74 (1893) Bd. 289, No. 2, S. 43-48.
- (20) Bomberg, M.:  
Water flow through porous materials, part II: Relative suction model  
for isothermal moisture flows.  
Lund: Lund Institute of Technology 1971, Report No. 20.
- (21) Bonnell, D. G. R.; Nottage, M. E.:  
Studies in porous materials with special reference to building  
materials. I.-The crystallisation of salts in porous materials.  
J. Soc. Chem. Ind., Trans. 58 (1939) No. 1, S. 16-21.
- (22) Bousquié, P.:  
Texture et porosité de roches calcaires. Thèse Doct.-Ing.  
Univ. Paris VI, Ecole Nat. Supér. des Mines Paris 1979, 191 pp.

- (23) Brace, W. F.:  
Behavior of rock salt, limestone, and anhydrite during indentation.  
J. Geophys. Res. 65 (1960) No. 6, S. 1773-1788.
- (24) Breyer, H.:  
Zur Frostbeständigkeit von Mauerziegeln.  
Ziegelind. 4 (1951) No. 12, S. 352-355.
- (25) Breyer, H.:  
Wasser, Frost und Frostbeständigkeit bei natürlichen und künstlichen  
Bausteinen. Tonind.-Ztg. 75 (1951) No. 9/10, S. 135-136.
- (26) Breyer, H.:  
Der S-Wert, das einzige verlässliche Kriterium für die Beurteilung der  
Frostbeständigkeit keramischer Erzeugnisse. Ziegelind. 8 (1955)  
No. 11, S. 433-436.
- (27) Breyer, H.:  
Gründe und Ursachen für die Zerstörung der Bau- und Werksteine am  
Kölner Dom. Steinbruch und Sandgrube 53 (1960) No. 6, S. 269-274;  
No. 7, S. 311-314.
- (28) Breyer, H.:  
Gesichtspunkte zum Vergang der Naturbau- und Werksteine.  
in: Simposio sobre la alteración de los materiales pétreos utilizados  
en los monumentos, Madrid 08/11/ - 10/11/1965. Instituto Central de  
Conservación y Restauración de Obras de Arte, Arqueología y Etnología,  
Madrid 1967, S. 113-124.
- (29) Broch, E.; Franklin, J. A.:  
The point-load strength test. Internat. J. Rock Mech. Min. Sci.  
9 (1972) S. 669-697.
- (30) Brunauer, S.; Emmett, P.; Teller, E.:  
Adsorption of gases in multimolecular layer. J. Amer. Chem. Soc. 60  
(1938) S. 309-319.
- (31) Budnikov, P. P.; Bloch, G. S.:  
Indirekte Einschätzung der Frostbeständigkeit von Baustoffen (Orig.  
russ.). in: Neorganiceškie Materialy, hrsg. v. AN SSSR, Izd. Fiz. Chim.  
Technol. Neorg. Mater., Moskva: Nauka 1968, S. 405-411.
- (32) Building Research Board, Report of the... for the year 1927;  
ed. by Department of Scientific and Industrial Research,  
London: H. M. Stationery Office 1928, S. 7-43.
- (33) Building Research Board, Report of the... for the year 1933;  
ed. by Department of Scientific and Industrial Research,  
London: H. M. Stationery Office 1934, S. 5-19.
- (34) Building Research Board, Report of the... for the year 1937;  
ed. by Department of the Scientific and Industrial Research,  
London: H. M. Stationery Office 1938, S. 19-38.
- (35) Burrows, H. W.:  
Examination of building stones. Trans. Royal Inst. Brit. Archit. 9  
(1893) S. 284-300.
- (36) Butterworth, B.:  
The correlation of laboratory tests with the weathering properties of  
bricks. I.-Scope of the investigation and description of ground expo-  
sure test. Brit. Clayworker 43 (1935) No. 1, S. 285-295.

- (37) Carlsson, O.:  
Porengröße und Frostbeständigkeit von Bausteinen. Ber. Dt. Keram. Ges. 31 (1954) No. 7, S. 230-239; 261-270.
- (37a) Choquette, P.W.; Pray, L. C.:  
Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists 54 (1970) No. 2, S. 207-250.
- (38) Colback, P. S. B.; Wiid, B. L.:  
The influence of moisture content on the compressive strength of rocks. Proc. Symp. on Rock Mechanics, Toronto 1965, S. 65-83.
- (39) Danßmann, J.; Niesel, K.:  
Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat = Essai de cristallisation au sulfate de sodium. Berlin : Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 1978. Farbfilm, 16 mm, Magnetton, 24 Bilder/Sekunde, Laufzeit: 4 Minuten, Länge 40 m, Erstaufführung am 6.6.1978 anlässlich des UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06/ - 09/06/1978.
- (40) Dearman, W. R.; Irfan, T. Y.:  
Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests. UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06/ - 09/06/1978 (Report 2.3) 35 pp.
- (41) Deere, D. U.; Miller, R. P.:  
Engineering classification and index properties for intact rock. Tech. Report No. AFWL-TR-65-116; Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico 1966, 302 pp.
- (42) Dietzel, A.:  
Frostbeständigkeit. Ziegel-Bau-Taschenbuch 1956, 6. Jg., hrsg. v. Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.; Wiesbaden: Krausskopf-Verlag 1956, S. 33-37.
- (43) DIN 456:  
Dachziegel. Anforderungen, Prüfung, Überwachung. Ausgabe August 1976, 10 pp.
- (44) DIN 1168 Teil 2:  
Baugipse. Anforderungen, Prüfung, Überwachung. Ausgabe Juli 1975, 7 pp.
- (45) DIN 51 058 Teil 1:  
Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe. Bestimmung der spezifischen Gasdurchlässigkeit feuerfester Steine. Ausgabe Juni 1963, 3 pp.
- (46) DIN 51 220:  
Werkstoffprüfmaschinen. Allgemeine Richtlinien. Ausgabe Oktober 1976, 3 pp.
- (47) DIN 51 223:  
Werkstoffprüfmaschinen. Druckprüfmaschinen. Ausgabe Dezember 1977, 3pp.
- (48) DIN 52 102:  
Prüfung von Naturstein. Bestimmung der Dichte. Rohdichte, Reindichte, Dichtigkeitsgrad, Gesamtporosität. Ausgabe September 1965, 3 pp.
- (49) DIN 52 103:  
Prüfung von Naturstein. Bestimmung der Wasseraufnahme. Ausgabe November 1972, 2 pp.

- (50) DIN 52 104:  
Prüfung von Naturstein. Frostbeständigkeit.  
Ausgabe November 1942 x, 1 p.
- (51) DIN 52 104:  
Prüfung von Naturstein. Frostwechselfersuch. Ausgabe Mai 1976, 2 pp.
- (52) DIN 52 105:  
Prüfung von Naturstein. Druckfestigkeit. Ausgabe November 1942, 1p.
- (53) DIN 52 105:  
Prüfung von Naturstein. Druckversuch. Ausgabe August 1965, 1 p.
- (54) DIN 52 108:  
Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe. Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme. Schleifscheiben-Verfahren.  
Ausgabe August 1968, 3 pp.
- (55) DIN 52 111:  
Prüfung von Naturstein. Kristallisationsversuch.  
Ausgabe September 1942 x, 1 p.
- (56) DIN 52 111:  
Prüfung von Naturstein. Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat.  
Ausgabe Dezember 1976, 2 pp.
- (57) DIN 52 113:  
Prüfung von Naturstein. Bestimmung des Sättigungswertes.  
Ausgabe März 1965, 2 pp.
- (58) DIN 52 617 E:  
Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Baustoffen und Beschichtungen. Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung.  
Entwurf Dezember 1979, 3 pp.
- (59) Duffaut, P.; Wojtkowiak, F.; Josien, J. P.; Pineau, J. L.:  
Les vides, principal facteur du comportement mécanique des roches.  
Proc. Fourth Internat. Soc. Rock Mechanics, Montreux 02/09/ -  
08/09/1979; Rotterdam: A. A. Balkema 1979, vol. 1, S. 115-121.
- (60) Dugdale, D. S.:  
Vickers hardness and compressive strength.  
J. Mech. Phys. Solids 6 (1958) S. 85-91.
- (61) Dunn, D. E.; LaFountain, L. J.; Jackson, R. E.:  
Porosity dependence and mechanism of brittle fracture in sandstones.  
J. Geophys. Res. 78 (1973) No. 14, S. 2403-2417.
- (62) Efes, Y.:  
Bericht über das Forschungsvorhaben "Einfluß der Porosität auf die Korrosion der am Kölner Dom verwendeten Naturbausteine".  
in: Sitzung des Arbeitskreises "Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Steine", hrsg. v. H. J. Oel, Hannover: Stiftung Volkswagenwerk 1980, S. 78-93.
- (63) Enberg, C.:  
Frostbeständigkeit und kapillare Steiggeschwindigkeit bei Dachziegeln.  
Österr. Ziegler-Ztg. 5 (1955) No. 2, S. 38-39.

- (64) Fagerlund, G.:  
Degré critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction.  
Matér. Constr. 4 (1971) No. 23, S. 271-285.
- (65) Félix, C.:  
Caractères pétrographiques et comportement par rapport à l'eau de grès molassiques du Plateau suisse. Comparaison avec d'autres grès. in: The conservation of stone II. Preprints of the contributions to the Internat. Symp. on the Conservation of Stone, Bologna 27/10/ - 30/10/1981 (Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, No. 31); ed. by R. Rossi-Manaresi, Bologna: Centro per la Conservazione delle Sculture all'aperto 1981, part A, S. 219-232.
- (66) Friedman, G. M.:  
Determination of sieve-size distribution from thin-section data for sedimentary petrological studies. J. Geol. 66 (1958) S. 394-416.
- (67) Gauri, K. L.; Doderer, G. C.; Lipscomb, N. T.; Sarma, A. C.:  
Reactivity of treated and untreated marble specimens in an SO<sub>2</sub> atmosphere. Studies in Conservation 18 (1973) S. 25-35.
- (68) Gérard, R.:  
Trois méthodes d'essai de gélivité récemment normalisées en Belgique UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06/ - 09/06/1978 (Report 3.2), 18 pp.
- (69) Graf, O.:  
Ueber Versuche zur Ermittlung des Widerstandes von nichtmetallischen Baustoffen gegen Abnutzung. Straßenbau 18 (1927) No. 33, S. 563-567.
- (70) Graf, O.:  
Untersuchungen über den Abschleifwiderstand von Baustoffen, insbesondere von Gesteinen. Straßenbau 21 (1930) No. 33, S. 579-588.
- (71) Griffith, J. H.:  
Physical properties of typical American rocks. Iowa Engineering Experiment Station Bulletin 131, Ames, Iowa: Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts 1937, vol. 35, No. 42, 56 pp.
- (72) Grunert, S.:  
Bericht über einen Langzeitversuch zur Verwitterung von Sandsteinwerksteinen an Bauwerken. Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol., Dresden 27 (1977) S. 63-89.
- (73) Grunert, S.:  
Versuche zur künstlichen Färbung von Sandstein für die Farbgestaltung an Bauwerken. Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol., Dresden 27 (1977) S. 91-102.
- (74) Guidetti, G. P.:  
Cause di degradazione delle pietre all'aperto e metodi di intervento. Atti dell'Accademia delle Scienze di Ferrara 49 (1971/1972) S. 37-59.
- (75) Gùldenpfennig, H.:  
Der Zustand des Kölner Doms und die Arbeit der Dombauhütte. in: Tag für Denkmalpflege und Heimatschutz, Köln 1930, Tagungsbericht; Berlin: Deutscher Kunstverlag 1931, S. 91-119.



- (76) Guyer, A. jr.; Böhlen, B.; Guyer, A.:  
Über die Bestimmung von Porengrößen. *Helvetica chimica acta* 42 (1959)  
No. 6, S. 2103-2110.
- (77) Hamrol, A.:  
A quantitative classification of the weathering and weatherability of  
rocks. Proc. 5th Internat. Confer. on Soil Mechanics and Foundation  
Engineering, Paris 17/07/ - 22/07/1961, Paris: Dunod 1961, vol. II,  
Report 7/3, S. 771-774.
- (78) Hanisch, A.:  
Druckfestigkeit und Abnutzung künstlicher Bausteine und Fußbodenbeläge.  
*Mitt. Technol. Gewerbe-Museums, N. F.* 18 (1908) S. 58-67.
- (79) Hanisch, A.:  
Weathering resistance of building stones. For the report of the  
Commission on problem 7. 6th Congr. Internat. Assoc. Test. Mater.,  
New York 1912, part XIX<sub>1</sub>, Spec. Report IV, S. 19-23.
- (80) Hansen, N.; Littmann, W.:  
Gerät zur Bestimmung der Oberflächengröße feinteiliger Substanzen  
durch Gasadsorption. BRD-Pat. 42 1 - 13/03 (G 01 n), Nr. 1 202 540,  
11.08.1962.
- (81) Hantsche, H.:  
Energiedispersive Röntgenmikroanalyse - Anwendungsgebiete, Grenzen und  
Fehlermöglichkeiten. *GIT Fachz. f. d. Lab.* 25 (1981) No. 9, S. 682-698.
- (82) Harley, G. T.:  
Proposed ground classification for mining purposes.  
*Eng. Min. J.* 122 (1926) No. 10, S. 368-372; No. 11, S. 413-416.
- (82a) Harvey, R. D.; Fraser, G. S.; Baxter, J. W.:  
Properties of carbonate rocks affecting soundness of aggregate - a  
progress report. *Illinois Mineral Note* 54; Urbana, Illinois: Illinois  
State Geological Survey 1974, 20 pp.
- (83) Hatsagortsian, Z. A.:  
La résistance des roches et la structure de leurs pores.  
Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure and Properties of  
Materials, Prague 18/09/ - 21/09/1973, ed. by S. Modrý and M. Svatá,  
Prague: Academia 1974, final report, part III, vol. V, D-267/D-275.
- (84) Hatsagortsian; hier: Acagorcyan, Z. A.; Nazaryan, R. A.;  
Čarčoglyan, A. G.:  
Zur Untersuchung der Verschleißfestigkeit von Natursteinmaterialien  
(Orig. russ.) *Promyšlennost' Armenii* 1971 No. 6, S. 63-66.
- (85) d'Havé, R.; Motteu, H.:  
A study of the frost-resistance of building materials. *Build  
International* 1 (1968) No. 2, S. 26-30.
- (86) d'Havé, R.; Motteu, H.:  
Etude de la résistance au gel des matériaux de construction. *L'Ind.  
Céram.* 1969 No. 617, S. 245-250.
- (87) Havlín, D.; Svatá, M.:  
Comparison of antique and modern roofing materials in terms of their  
porous structure. Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure  
and Properties of Materials, Prague 18/09/ - 21/09/1973, ed. by  
S. Modrý and M. Svatá, Prague: Academia 1974, final report, part IV,  
vol. VI, F-129/F-139.

- (88) Héricart de Thury, F.:  
Sur le procédé proposé par M. Brard pour reconnaître immédiatement les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée, et que l'on désigne ordinairement par les noms de pierres gelives ou pierres gelisses. Ann. Chim. Phys., Ser. 2, 38 (1828) S. 160-192.
- (89) Herrmann, A. G.; Knake, D.:  
Coulometrisches Verfahren zur Bestimmung von Gesamt-, Carbonat- und Nichtcarbonat-Kohlenstoff in magmatischen, metamorphen und sedimentären Gesteinen. Z. Anal. Chem. 266 (1973) No. 3, S. 196-201.
- (90) Hertel, B.:  
Die Wiederherstellungsarbeiten am Kölner Dome. Z. Rhein. Vereins für Denkmalpflege und Heimatschutz 19 (1927) No. 3, S. 39-91.
- (91) Hirschwald, J.:  
Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn 1908, 675 pp.
- (92) Hirschwald, J.:  
Die schalenförmige Verwitterung und ihre Beziehung zu dem Gehalt der Gesteine an wasserlöslichen Bestandteilen. Bautechnische Gesteinsuntersuchungen, Berlin 1 (1910) S. 47-60.
- (93) Hochstetter, R.:  
The pore structure of some building materials and their resistance against the combined attack of frost and salt solutions. Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure and Properties of Materials, Prague 18/09/ - 21/09/1973, ed. by S. Modrý and M. Svatá, Prague: Academia 1974, final report, part IV, vol. VI, F-51/F-66.
- (94) Höfer, H.:  
Zur Beurtheilung der Wetterbeständigkeit der Bausteine. Dt. Baugewerks-Bl. 17 (1898) S. 138-139.
- (95) Hörmann, H.:  
Denkmalpflege und Steinschutz in England. München: Verlag Georg D. W. Callwey 1928, 100 pp.
- (96) Hoffmann, D.:  
Probleme bei der Simulation der Verwitterung von kalkhaltigen Baustoffen in schwefeloxidhaltiger Atmosphäre. Berliner Beitr. Archäometrie 5 (1980) S. 197-211.
- (97) Hoffmann, D.; Niesel, K.:  
Ein neues Verfahren zur Beurteilung des Verschleißverhaltens von mineralischen Baustoffen. Tonind.-Ztg. 99 (1975) No. 9, S. 221-223.
- (98) Hoffmann, D.; Schimmelwitz, P.; Roß, H.:  
Interactions of sulfur dioxide with lime plasters. in: 2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones, Athens 27/09/ - 01/10/1976; Athens: The Chair of Physical Chemistry of the National Technical University of Athens 1977, S. 37-42. - Deutsche Fassung: Wechselwirkung zwischen Schwefeldioxid und Kalkmörteln. Materialprüf. 19 (1977) No. 8, S. 300-304.
- (99) Honeyborne, D. B.; Harris, P. B.:  
The structure of porous building stone and its relation to weathering behaviour. The structure and properties of porous materials. Proc. Tenth Symp. Colston Research Society, Bristol 24/03/ - 27/03/1958, London: Butterworth's Scientific Publications 1958, S. 343-365.

- (100) Hoshino, K.:  
Effect of porosity on the strength of the clastic sedimentary rocks. Proc. 3rd Congress Internat. Soc. Rock Mechanics, Denver, Colo. 01/09/ - 07/09/1974, Washington, D. C.: Nat. Acad. Sci. 1974, vol. II, part A, S. 511-516.
- (100a) Houpert, R.; Konomi, N.; Tisot, J. P.:  
Structure, propriétés physiques et comportement mécanique des roches calcaires. in: 3rd Internat. Congress on Engineering Geology, Madrid, Sept. 1978, Report III/19, S. 191-199.
- (101) Hummel, A.:  
Das Beton-ABC. 12. Aufl., Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1959, S. 24.
- (102) Hundt, J.:  
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, No. 256, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1975 (=Diss. Techn. Univ. Berlin 1975, 108 pp.) S. 55.
- (103) Iliev, I. G.:  
An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. Proc. First Congr. Internat. Soc. Rock Mechanics, Lisboa 25/09/ - 01/10/1966, Lisboa: Lab. Nac. Engenh. Civil 1966, vol. I, Report 2.3, S. 109-114.
- (104) Judd, W. R.; Huber, C.:  
Correlation of rock properties by statistical methods. Internat. Symp. on Mining Research, Rolla, Missouri 22/02/ - 25/02/1961; Proceedings, hrsg. v. G. B. Clark; Oxford, London, New York, Paris: Pergamon Press 1962, vol. 2, S. 621-648.
- (105) Junge, C. E.; Werby, R. T.:  
The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium, and sulfate in rain water over the United States. J. Meteorol. 15 (1958) No. 5, S. 417-425.
- (106) Kaiser, E.:  
Ueber Verwitterungserscheinungen an Bausteinen. I. Der Stubensandstein aus Württemberg, namentlich in seiner Verwendung am Cölner Dom. N. Jahrb. Mineral. Geol. Paläont., 2. Bd. 100 (1907) S. 42-64.
- (107) Kaiser, E.:  
Über eine Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der in der freien Natur. Chemie d. Erde 4 (1929) S. 290-342.
- (108) Kallauner, O:  
Kann man aus der Scherbendichte von gebrannten Vollziegeln auf ihre Druckfestigkeit schließen? (Orig. tschech.) Stavivo, Brno (1933) S. 332-334.
- (109) Keil, F.:  
Luftporen-Beton. Zement-Kalk-Gips 6 (1953) No. 5, S. 137-151.
- (110) Keil, K.:  
Zur Frage der Frostbeständigkeit von Felsgesteinen. Naturstein-Ind. 6 (1970) No. 1/2, S. 11-16; No. 3, S. 54-61.

- (111) Kessler, D. W.; Sligh, W. H.:  
Physical properties of the principal commercial limestones used for building construction in the United States. XX. Artificial weathering tests. Technol. Papers Bur. Stand. 21 (1926/1927) No. 349, S. 543-545.
- (112) Kesternich, W.:  
Prüfung metallischer und nichtmetallischer Schutzüberzüge auf Korrosionsbeständigkeit in einer künstlichen Industrielatmosphäre. Stahl u. Eisen 71 (1951) No. 11, S. 587-588.
- (113) Kieslinger, A.:  
Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. Leipzig, Wien: Franz Deuticke 1932, S. 6.
- (114) King, R. F.; Tabor, D.:  
The strength properties and frictional behaviour of brittle solids. Proc. Royal Soc. London, Ser. A, 223 (1954) No. 1153, S. 225-238.
- (115) van der Kloes, J. A.:  
A manual for masons, bricklayers, concrete workers and plasterers; rev. by A. B. Searle, London: J. & A. Churchill 1914, S. 11-22.
- (116) Koller, J.:  
Ursachen der Verwitterungsschäden an steinartigen Baustoffen. Bautenschutz u. Bausanierung 2 (1979) No. 1, S. 8-12.
- (117) Krüger, L.:  
Abnutzbarkeit durch Schleifen. Straßenbau 21 (1930) No. 33, S. 588-593.
- (118) Krumbein, W. C.:  
Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. J. Sed. Petrol. 11 (1941) No. 2, S. 64-72.
- (119) Künzel, H.:  
Gasbeton. Wärme und Feuchtigkeitsverhalten. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag GmbH 1971, S. 25.
- (120) Künzel, H.; Schwarz, B.:  
Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. in: Wasserdampfdurchlässigkeit und Feuchtigkeitsverteilung bei Baustoffen und Bauteilen. Berichte aus der Bauforschung, No. 51, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1968, S. 99-113.
- (121) Laurie, A. P.:  
Stone decay and the preservation of building. J. Soc. Chem. Ind., Trans. 44 (1925) S. 86T-92T.
- (122) Lautridou, J.-P.; Ozouf, J.-C.:  
Relations entre la gélivité et les propriétés physiques (porosité, ascension capillaire) des roches calcaires. UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06/ - 09/06/1978 (Report 3.3) 15 pp.
- (123) Leary, E.:  
A preliminary assessment of capillary tests as indicators of the durability of British limestones. in: The conservation of stone II. Preprints of the contributions to the Internat. Symp. on the Conservation of Stone, Bologna 27/10/ - 30/10/1981 (Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, No. 31); hrsg. v. R. Rossi-Manaresi, Bologna: Centro per la Conservazione delle Sculture all'aperto 1981, part A, S. 73-90.

- (124) Lehmann, H.:  
Die Beurteilung der Frostbeständigkeit grobkeramischer Erzeugnisse mit Hilfe dilatometrischer Messungen. Ziegelind. 8 (1955) No. 15, S. 569-574.
- (125) Lichtner, B.; Hundt, J.:  
Porositätsmessungen an Zementmörtel und Beton. Tonind.-Ztg. 96 (1972) No. 8, S. 232-236.
- (126) Litvan, G. G.:  
Phase transitions of adsorbates. Part 3. - Heat effects and dimensional changes in nonequilibrium temperature cycles. J. Coll. Interface Sci. 38 (1972) No. 1, S. 75-83.
- (127) Litvan, G. G.:  
Pore structure and frost susceptibility of building materials. Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure and Properties of Materials, 18/09/ - 21/09/1973, Prague, ed. by S. Modrý and M. Svata, Prague: Academia 1973, preliminary report, part II, vol. II, F-17/F-30.
- (128) Litvan, G. G.:  
Frost action in porous systems. Séminaire "Altération et Durabilité des Bétons et des Pierres", St-Rémy-lès-Chevreuse, Yvelines 17/11/ - 19/11/1981; College International des Sciences de la Construction-I.T.B.T.P. 1981, 15 pp.
- (129) Longuet, M.:  
Mise au point des méthodes d'appréciation de la résistance au gel des matériaux poreux - Het op punt stellen van methoden ter beoordeling van de vorstweerstand van poreuze materialen. Silicates Ind. 43 (1978) No. 12, S. 275-287; 45 (1980) No. 7/8, S. 133-154.
- (130) Mamillan, M.:  
La gélivité des matériaux. Ann. Inst. Techn. Bâtiment Trav. Publ., Ser. Matér. 20 (1967) No. 235/236, S. 1017-1051.
- (131) Mamillan, M.:  
Nouvelles connaissances pour l'utilisation et la protection des pierres de construction. Ann. Inst. Techn. Bâtiment Trav. Publ. 29 (1976) No. 334, Sér. Matér. No. 48, S. 17-48.
- (132) Mamillan, M.:  
Connaissances actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs. in: The conservation of stone II. Preprints of the contributions to the Internat. Symp. on the Conservation of Stone, Bologna 27/10/ - 30/10/1981 (Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, No. 31); ed. by R. Rossi-Manaresi, Bologna: Centro per la Conservazione della Sculture all'aperto 1981, part A, S. 59-72.
- (133) Marušínová, S.:  
Freezing of water in porous materials. Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure and Properties of Materials, Prague 18/09/ - 21/09/1973, ed. by S. Modrý and M. Svata, Prague: Academia 1974, final report, part IV, vol. VI, F-79/F-87.
- (133a) Massengale, G. B.; Mong, L. E.; Heindl, R. A.:  
Permeability and some other properties of a variety of refractory materials:II. J. Amer. Ceram. Soc. 36 (1953) No. 8, S. 273-278.



- (134) Mayer, N.:  
Eine Vielfach-Meßdüse zur Bestimmung von Dickenänderungen an sehr  
rauen Materialproben. Techn. Messen 46 (1979) No. 12, S. 459-461.
- (135) Mayer, N.; Niesel, K.:  
Verschleißprüfung mineralischer Baustoffe mit rauher Oberfläche unter  
Anwendung eines pneumatischen Dickenmeßgeräts. Materialprüf. 21 (1979)  
No. 4, S. 112-116.
- (136) McBurney, J. W.; Lovewell, C. E.:  
Strength, water absorption, and weather resistance of building bricks  
produced in the United States. Proc. Amer. Soc. Testing  
Materials, part I, 33 (1933) S. 636-650.
- (137) McIntyre, W. A.:  
Factors governing the durability of clay building materials. - I.  
Trans. Ceram. Soc. 28 (1929) S. 101-123.
- (138) Meder, H.:  
Über die Berechnung der Permeabilität von Sandsteinen aus Porosität und  
Korngrößenverteilung. Diss. Fak. Naturwiss. Geisteswiss. Bergakad.  
Clausthal - Techn. Hochsch., 1965, 100 pp.
- (139) Mello Mendes, F.; Aires-Barros, L.; Peres Rodrigues, F.:  
The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock  
masses. Proc. First Congress Internat. Soc. Rock Mechanics, Lisboa  
25/09/ - 01/10/1966; Lisboa: Lab. Nac. Engh. Civil 1966, vol. 1, Report  
2.20, S. 217-223.
- (140) Millot, D.; Cogné, J.; Jeannette, D.; Besnus, Y.; Monnet, B.;  
Guri, F.; Schimpf, A.:  
La maladie des grès de la cathédrale de Strasbourg. Bull. Service Carte  
géol. Als. Lorr. 20 (1967) S. 131-157.
- (141) Müller, E.:  
Zur Prüfung der Baumaterialien. Dt. Bauztg. 1882, No. 5, S. 23.
- (142) Munk, D.:  
Die Prüfung der Brinellhärte nach dem Eindringtieffenmeßverfahren.  
in: Härteprüfung in Theorie und Praxis. VDI-Berichte 1978,  
No. 308, S. 129-134.
- (143) NBN B 05-201:  
Essais des matériaux de construction. Gélivité. Capacité d'imprégnation  
d'eau par capillarité. Ausgabe Februar 1976, 12 pp.
- (144) Niesel, K.:  
Bauwerke von Luftverschmutzung bedroht - Beitrag der Materialforschung  
zum Denkmalschutz. GIT Fachz. f. d. Lab. 23 (1979) No. 2, S. 105-109.
- (145) Niesel, K.:  
Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeloxidhaltiger Atmosphäre -  
Literaturdiskussion. Fortschr. Miner. 57 (1979) No. 1, S. 68-124.
- (146) Niesel, K.:  
Kriterien für das Verwitterungsverhalten von Bausteinen unter Berück-  
sichtigung von Materialkennwerten. Berliner Beitr. Archäometrie 5  
(1980) S. 213-227.

- (147) Niesel, K.:  
Critères pour le comportement à l'altération de pierres en oeuvre, compte tenu d'une sélection de valeurs caractéristiques. GP News Letter (Group Petrography ICOMOS) 2 (1981) No. 2, S. 6-14.
- (148) Niesel, K.:  
Durability of porous building stone: importance of judgement criteria related to its structure. in: The conservation of stone II. Preprints of the contributions to the Internat. Symp. on the Conservation of Stone, Bologna 27/10/ - 30/10/1981 (Rapporti della Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici per le Province di Bologna, Ferrara, Forlì e Ravenna, No. 31); ed. by R. Rossi-Manaresi, Bologna: Centro per la Conservazione delle Sculture all' aperto 1981, part A, S. 47-57. - Ausführlichere deutsche Fassung: Möglichkeiten der Beurteilung des Verwitterungsverhaltens von porösen Werksteinen: Bedeutung der gefügeabhängigen Kriterien. Fortschr. Miner. 60 (1982) No. 1, S. 81-100.
- (149) Niesel, K.; Schimmelwitz, P.:  
Zur Kenntnis der Vorgänge bei der Erhärtung und Verwitterung von Dolomitkalkmörteln. Tonind.-Ztg. 95 (1971) No. 6, S. 153-161.
- (150) Niesel, K.; Schimmelwitz, P.:  
Deux méthodes pour caractériser des processus lors de l'altération de pierres de construction. in: 2nd Internat. Symp. on the Deterioration of Building Stones, Athens 27/09/ - 01/10/1976; Athens: The Chair of Physical Chemistry of the National Technical University of Athens 1977, S. 127-131. - Deutsche Fassung: Zwei Verfahren zur Kennzeichnung von Vorgängen bei der Verwitterung von Bausteinen. Materialprüf. 19 (1977) No. 8, S. 310-314.
- (151) Obert, L.; Windes, S. L.; Duvall, W. I.:  
Standardized tests for determining the physical properties of mine rock. Report of Inv. 3891, College Park, Md.: U. S. Dept. of the Interior; Bureau of Mines 1946, 67 pp.
- (152) Ohnemüller, W.; Solf, A.:  
Bestimmung von Kohlendioxyd in Kalksteinen und gebrannten Kalkprodukten durch "Coulometrische Titration". Zement-Kalk-Gips 23 (1970) No. 5, S. 200-202.
- (153) Olschewsky, W.:  
Die Ursachen der Verwitterung bei Verblendsteinen und Terrakotten. Halle: Verlag v. Wilhelm Knapp 1885, 54 pp.
- (154) Onodera, T. F.; Yoshinaka, R.; Oda, M.:  
Weathering and its relation to mechanical properties of granite. Proc. 3rd Congress Internat. Soc. Rock Mechanics, Denver, Colo.; 01/09/ - 07/09/1974, Washington D. C.: Nat. Acad. Sci. 1974, vol. II, part A, S. 71-78.
- (155) Oppermann, H.-U.:  
Die Gasdurchlässigkeit von Kalziumsilikatprodukten. 2. Internat. Symp. f. dampfgehärtete Kalziumsilikatbaustoffe, Hannover 25/03/ - 28/03/1969, Vortrag 53, 42 pp.
- (156) Palmer, L. A.; Hall, J. V.:  
Some results of freezing-and-thawing tests made with clay face brick. Proc. Amer. Soc. Test. Mater. part II, 30 (1930) S. 767-782.

- (157) Pellerin, F. M.:  
La pétrophysique: une branche de la pétrographie directement applicable à l'altérologie des pierres en oeuvre. GP News Letter (Group Petrography, ICOMOS) 1980, No. 1, S. 3-9.
- (158) Poggi, L. A.:  
A proposito della definizione fisica della gelività dei corpi porosi. L'Ind. Ital. dei Laterizi 6 (1951) S. 239-243.
- (159) Polak, E. J.:  
The measurements of, relations between and factors affecting the properties of rocks. Fourth Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1963, S. 220-224.
- (160) Price, C. A.:  
Testing porous building stone. Architects' J. 162 (1975) No. 33, S. 337-339.
- (161) Price, C. A.:  
The use of the sodium sulphate crystallisation test for determining the weathering resistance of untreated stone. UNESCO/RILEM Intern. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments. Paris 05/06/ - 09/06/1978 (Report 3.6), 23 pp.
- (162) Protod'yakonov, M. M.:  
Mechanical properties and drillability of rocks.  
in: Mechanical properties of rocks, Academy of Science of the USSR, Government Committee for Fuel Industry, Isdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, Moskva 1963; Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 1969, S. 164-176.
- (163) Rathgen, F.:  
Steinschutz durch Leinöl und Wachs. Denkmalpflege u. Heimatschutz 31 (1929) S. 51-52.
- (164) Rauschenfels, E.:  
Untersuchungen über die Frostwiderstandsfähigkeit von Kalksteinen. Diss. Fak. Bergb. Hüttenwes. Maschinenwes., Techn. Univ. Clausthal, 1970, 85 pp.
- (165) Ravaglioli, A.:  
Il problema della gelività nei cotti ceramici: parametri chimico-fisici connessi col fenomeno e metodi di misura. Ceramica Informazione 12 (1977) No. 10, S. 543-557.
- (166) Ravaglioli, A.; Vecchi, G.:  
Assessment of the frost resistance of ceramic bodies by means of porosity meter tests. Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure and Properties of Materials, Prague 18/09/ - 21/09/1973, ed. by S. Modrý and M. Svata, Prague: Academia 1974, final report, part IV, vol. VI, F-117/F-127.
- (167) Reinhardt, V.:  
Sättigungswert oder Frosttauwechselfersuch? Über die Brauchbarkeit der derzeitigen Frostkriterien. Naturstein-Ind. 6 (1970) No. 7, S. 232-235.
- (168) Richards, C. W.:  
Hardness.  
in: Engineering Materials Science. Hrsg. v. E. A. Trabant (Wadsworth Engineering Science Series); London: Chapman & Hall Ltd. 1961, S. 396-411.

- (169) Rieckmann, M.:  
Untersuchung von Turbulenzerscheinungen beim Fließen von Gasen durch Speichergesteine unter Berücksichtigung der Gleitströmung. *Erdoel-Erdgas-Z.* 86 (1970) No. 2, S. 36-51.
- (170) RILEM 25 P.E.M.:  
Essai No. II. 1: Coefficient de saturation - Saturation coefficient. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Essais caractérisant les propriétés liées à la présence et au mouvement de l'eau. Colloque International UNESCO/RILEM sur l'Altération et la Protection des Monuments en Pierre, Paris 05/06/ - 09/06/1978, suppl. vol. V, 1979, 8 pp. (=Matér. Constr. 13 (1980) No. 75, S. 194-197).
- (171) RILEM 25 P.E.M.:  
Essai No. IV. 2: Résistance à l'abrasion - Abrasion resistance. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Essais caractérisant les propriétés mécaniques de la surface. UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06/ - 09/06/1978, suppl. vol. V, 1979, 4 pp. (= Matér. Constr. 13 (1980) No. 75, S. 230-233).
- (172) Rittenhouse, G.:  
A visual method of estimating two-dimensional sphericity. *J. Sediment. Petrol.* 13 (1943) No. 2, S. 79-81.
- (173) Ritter, H. L.; Drake, L. C.:  
Pore-size distribution in porous materials. *Ind. Eng. Chem., Anal. Ed.* 17 (1945) S. 782-791.
- (174) Robinson, G. C.; Holman, J. R.; Edwards, J. F.:  
Relation between physical properties and durability of commercially marketed brick. *Amer. Ceram. Soc. Bull.* 56 (1977) No. 12, S. 1071-1075; 1079.
- (175) Rocha, M.:  
Mechanical behaviour of rock foundations in concrete dams. Eighth Internat. Congress on Large Dams, Edinburgh, Great Britain 04/05/ - 08/05/1964, Paris: Editions Gauthier-Villars 1964, vol. 1, question 28, Report 44, S. 785-831.
- (176) Saleem, A.:  
Flue gas scrubbing with limestone slurry. *J. Air Poll. Contr. Assoc.* 22 (1972) No. 3, S. 172-176.
- (177) Schäfer, A.:  
Frostwiderstand und Porengefüge des Betons. Beziehungen und Prüfverfahren. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, No. 167, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1964, 57 pp.
- (178) Schaefer, E.:  
Zuverlässigkeit - 3.9. Weibull-Verteilung. *Grundlagen. elektronikpraxis* 1976, No. 6, S. 34.
- (179) Schaffer, R. J.:  
The weathering of natural building stones. *Building Research Spec. Report* No. 18. London: H. M. Stationery Office 1932, facsimile reprint 1972; S. 69-72.

- (180) Schaffer, R. J.:  
Causes of the deterioration of building materials - 1. Chemical and physical causes. Chem. Ind. 1967, No. 38, S. 1584-1586.
- (181) Schimmelwitz, P.:  
Zum Problem der Probenahme in der Baustoffprüfung. Berliner Bauwirtschaft 22 (1971) No. 21, S. 737-740.
- (182) Schimmelwitz, P.; Hoffmann, D.:  
Untersuchung über die Erhärtung von Außenputzen aus Luftkalkmörtel und ihre Verwitterung unter besonderer Berücksichtigung der Einwirkung von Luftverunreinigungen. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben des European Recovery Program (ERP) Az 2222, 1977, 170 pp.
- (183) Schneider, H.:  
Über den Frostwiderstand von Dachziegeln und seine Prüfung. Ziegelind. 15 (1962) No. 8, S. 227-238; No. 9/10, S. 283-294; No. 11, S. 391-402; No. 12, S. 413-424; No. 13, S. 485-495.
- (184) Schulze, K.-H.:  
Porosität, Wasseraufnahme und Frostempfindlichkeit der Gesteine des Korallenoolith im Weser-Gebirge. Straßen- u. Tiefbau 23 (1969) No. 10, S. 918-925.
- (185) Schwarz, B.:  
Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Gesundheits-Ing. 93 (1972) No. 7, S. 206-211.
- (186) Seipp, H.:  
Die Wetterbeständigkeit der natürlichen Bausteine und die Wetterbeständigkeitsproben, mit besonderer Berücksichtigung der Dachschiefer. Jena: Hermann Costenoble 1900, 191 pp.
- (187) Seipp, H.:  
Die abgekürzte Wetterbeständigkeitsprobe der natürlichen Bausteine mit besonderer Berücksichtigung der Sandsteine, namentlich der Wesersandsteine. Frankfurt/Main: Verlag von Heinrich Keller 1905, 140 pp.
- (188) Setzer, M. J.:  
Frostbeständigkeit.  
in: Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, No. 280, Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn 1977, S. 80-103.
- (189) Shewhart, W. A.:  
Economic control of quality of manufactured product. Princeton, N. J., Toronto, London, New York: D. Van Nostrand Company, Inc. 1931, S. 58.
- (190) Širhal, H.:  
Die Bedeutung der Kenntnis des Porenvolumens und der Porengrößenverteilung im keramischen Scherben. Ziegelind. 21 (1968) No. 24, S. 572-583.
- (191) Smorodinov, M. I.; Motovilov, E. A.; Volkov, V. A.:  
Determinations of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks. Proc. 2nd Congress Internat. Soc. Rock Mechanics, Beograd 21/09/ - 26/09/1970 (Report 3-6) vol. II, S. 35-37.
- (192) Sommer, E.:  
Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porigen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen. Diss. Fak. Maschinenbau Techn. Hochsch. Darmstadt 1971, 197pp.



- (193) Stojs, A.:  
Frostbeständigkeit. Ziegel-Bautaschenbuch 1953, 3. Jg., hrsg. v. Bundesverb. Dt. Ziegelind., Bonn; Wiesbaden: Krausskopf-Verlag 1952, S. 69-73.
- (194) Stojs, A.; Claus, G.:  
Wo steht der Steinschutz? Bautenschutz 13 (1942) S. 9-15; 17-22.
- (195) Street, N.; Fun-Den-Wang:  
Surface potentials and rock strength. Proc. 1st Congr. Internat. Soc. Rock Mechanics, Lisboa 25/09/ - 01/10/1966, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil 1966, vol. 1, S. 451-456.
- (196) Tabor, D.:  
The physical meaning of indentation and scratch hardness. Brit. J. Appl. Phys. 7 (1956) S. 159-166.
- (197) Terry, R. D.; Chilingar, G. V.:  
Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations" by M. S. Shvetsov. J. Sediment. Petrol. 25 (1955) No. 3, S. 229-234.
- (198) Tetmajer, L.:  
Methoden und Resultate der Prüfung natürlicher und künstlicher Bausteine. in: Mittheilungen der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien am eidg. Polytechnikum in Zürich, No. 1; Zürich: Commissionsverlag von Meyer & Zeller 1884, 59 pp.
- (199) TGL 13 724:  
Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe. Bestimmung der spezifischen Gasdurchlässigkeit feuerfester Erzeugnisse. Ausgabe April 1964, 5 pp.
- (200) Torraca, G.:  
Physico-chemical deterioration of porous rigid building materials. Notes for a general model. Il mattone di Venezia. Atti del Convegno presso Fondazione Cini, Venezia 22/10/ - 23/10/1979; Venezia: Laboratorio per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del CNR; Università di Venezia 1979, S. 95-144.
- (201) Urbach, H.:  
Einige Abnutzversuche mit Kunststeinen. Tonind.-Ztg. 33 (1909) No. 89, S. 931-932.
- (202) Verein der österreichischen Zementfabrikanten: Internat. Kolloquium "Frostbeständigkeit von Beton", Wien 26/06/ - 27/06/1980. Mitt. Forschungsinst. Ver. österr. Zementfabrikanten 1980, No. 33, 200 pp.
- (203) Volkmann, H.:  
Umweltschutz und Rasterelektronenmikroskopie. Laborpraxis 3 (1979) No. 11, S. 26-29.
- (204) Vos, B. H.:  
Hygric methods for the determination of the behaviour of stones. - UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06/ - 09/06/1978 (Report 3.8), 19 pp.
- (205) Vosberg, G.:  
Die Frostbeständigkeit von Dachziegeln und ihre Beeinflussung durch den Fabrikationsgang. Diss. Techn. Hochsch. Stuttgart, 1946, 55 pp.

- (206) Walsh, J. B.; Brace, W. F.:  
Cracks and pores in rocks. Proc. 1<sup>st</sup> Congr. Internat. Soc. Rock  
Mechanics, Lisboa 25/09/ - 01/10/1966; Lisboa: Lab. Nac. Engenh. Civil  
1966, vol. I, Report 3.67, S. 643-646.
- (207) Walz, K.:  
Prüfung des Widerstands von Beton gegen mechanische Abnutzung, gegen  
Witterungseinflüsse und gegen angreifende Flüssigkeiten. in: Handbuch  
der Werkstoffprüfung, 2. Aufl., Bd. III, hrsg. v. O. Graf; Berlin,  
Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1957, S. 457-470.
- (208) Watson, J.:  
British and foreign building stones. Cambridge: University Press 1911,  
492 pp.
- (209) Whiteside, Th. M.; Sweet, H. S.:  
Effect of mortar saturation in freezing and thawing tests. Highway  
Research Board, Proc. 30<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington D. C. 1951,  
S. 204-216.
- (210) Wiggs, P. K. C.:  
The relation between gas permeability and pore structure of solids.  
in: The structure and properties of porous materials, ed. by D. H.  
Everett and F. S. Stone, Proc. Tenth Symp. Colston Research Society,  
Bristol 24/03/ - 27/03/1958; London: Butterworth's Scientific  
Publications 1958, S. 183-194.
- (211) Wijk, G.:  
The point load test for the tensile strength of rock. Geotechn.  
Test. J. 3 (1980) No. 2, S. 49-54.
- (212) Winkler, H. G. F.:  
Das Problem der Frostbeständigkeit von Dachziegeln. Ber. Dt.  
Keram. Ges. 36 (1959) No. 10, S. 327-332.
- (212a) Woolf, D. D.:  
Relation between absorption and soundness test of sedimentary rock.  
Rock Products 1928, 7. Januar, S. 39-40.
- (213) Žagar, L.:  
Über die Möglichkeiten einer erweiterten Verwendung des Quecksilberporo-  
simeters bei der Untersuchung von keramischen Werkstoffen und Erzeug-  
nissen. Sprechsaal Keramik, Glas, Email, Silikate 101 (1968) No. 24, S.  
1114-1120.

## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

**Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**  
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**  
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren**  
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**  
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**  
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

**Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

**Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**  
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**  
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**  
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**  
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**  
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**  
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

**Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**  
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**  
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**  
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**  
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin**

**Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**  
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —**

von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen**

von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**

von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**

von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**

von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

**Das Sprödbbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**

von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**  
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**  
**Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**  
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**  
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**  
von Dr.-Ing. U. Holzöhner

Nr. 49/Dezember 1977

**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**  
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**  
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**  
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**  
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**  
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54/Okttober 1978

**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/November 1978

**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/Januar 1979

**Stabilität von Sandwichbauteilen**  
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie

Nr. 57/März 1979

**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**  
**Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing**  
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

Nr. 58/März 1979

**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 59/Juli 1979

**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**  
von Dr.-Ing. Günther Plauk

Nr. 60/August 1979

**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**  
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs

Nr. 61/Dezember 1979

**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmatrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**  
von Dr. Klaus Richter

Nr. 62/Dezember 1979

**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**  
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker

Nr. 63/Dezember 1979

**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**  
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig

Nr. 64/Februar 1980

**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**  
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 65/Februar 1980

**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**  
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 66/Mai 1980

**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**  
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig



Nr. 67/Mai 1980

**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**

von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 68/Mai 1980

**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers**

von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn

Nr. 69/Juni 1980

**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**

von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl

Nr. 70/August 1980 (vergriffen)

**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**

von Dr.-Ing. Gerald Schickert

Nr. 71/August 1980

**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**

von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera

Nr. 72/September 1980

**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**

von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 73/November 1980

**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**

von Dipl.-Ing. Peter Wegener

Nr. 74/November 1980

**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**

von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller

Nr. 75/November 1980

**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**

von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 76/November 1980

**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**

von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig

Nr. 77/April 1981

**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**

von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 78/September 1981

**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**

von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 79/Dezember 1981

**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**

von Dr.-Ing. Volker Neumann

Nr. 80/Dezember 1981

**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**

von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch

Nr. 81/Dezember 1981

**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**

von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt

Nr. 82/April 1982

**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches**

**Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test**

von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski

Nr. 83/Juli 1982

**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen**

**— Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —**

von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle

Nr. 84/Juli 1982

**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**

von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Okttober 1982

**Technische Materialforschung und -prüfung**

**— Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ —**

**Materials Research and Testing**

**— Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme “Basic Technological Research“ —**

von Prof. Dr. Horst Czichos

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982

**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**

von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz