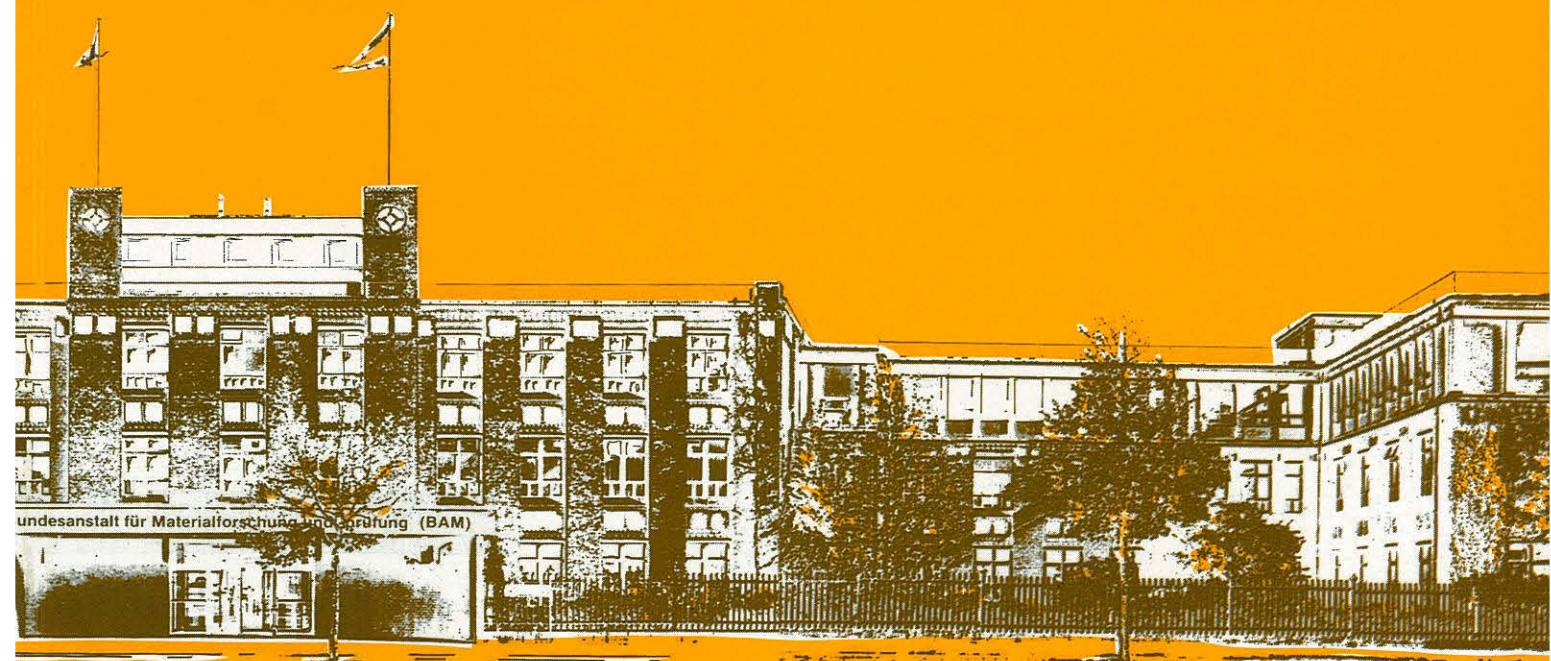


BAM Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung

Forschungsbericht 209

Zur Quantifizierung des Effekts von
Luftverunreinigungen auf Putzmörtel

Dr. rer. nat. Dirk Hoffmann und
Dr.-Ing. Konrad Niesel



Berlin 1995

Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Nachfolgeinstitution des Staatlichen Materialprüfungsamtes und der Chemisch-Technischen Reichsanstalt. Sie hat dementsprechend die Funktion einer material-technischen und chemisch-technischen Bundesanstalt.

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungserlaß „die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern“. Sie ist im Aufgabenverbund Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit zuständig für:

- Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich
- Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und Referenzverfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadens-

vermeidung bzw. Schadensfrüherkennung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

Unter der Leitlinie Sicherheit und Zuverlässigkeit in Materialtechnik und Chemie ist die BAM in folgenden Bereichen tätig:

- **Forschung und Entwicklung** auf den Gebieten des Aufgabenverbundes Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit
 - **Prüfung, Analyse, Zulassung** von Stoffen, Materialien und technischen Produkten auf der Basis von Gesetzen, Verordnungen oder technischen Regeln
 - **Beratung und Information** von Bundesministerien, Wirtschaftsverbänden, Industrieunternehmen und Verbraucherorganisationen sowie Mitwirkung in nationalen und internationalen Gremien und Normenausschüssen.
- Daneben ist sie in die internationale und technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich Meßwesen-Normung-Prüftechnik-Qualitätssicherung (MNPQ) nationale Institution für die Prüftechnik.

Mit ihren Aufgaben und Tätigkeiten verfolgt die BAM die Ziele:

- Leistungssteigerung der Wirtschaft
- Erweiterung der technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse
- Sicherung und Verbesserung der Lebensbedingungen.

Forschungsbericht 209

Zur Quantifizierung des Effekts von Luftverunreinigungen auf Putzmörtel

Dr. rer. nat. Dirk Hoffmann und
Dr.-Ing. Konrad Niesel

Berlin 1995

72 Seiten, 68 Abbildungen, 12 Tabellen

Herausgegeben von der

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
☒ 12200 Berlin
Telefon (0 30) 81 04-0
Telefax (0 30) 811 20 29

Copyright©1994 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Am Alten Hafen 113-115, 27568 Bremerhaven
☒ Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven
Telefon (0471) 4 60 93
Telefax (0471) 4 27 65

ISSN 0938-5533
ISBN 3-89429-594-5

Inhalt ¹⁾

Das Aufstellen von Dosis/Wirkungs-Beziehungen beim Angriff von schwefel- und stickstoffoxidhaltiger Atmosphäre auf freigelagerte, aber regengeschützte Platten aus unterschiedlichen Putzmörteln, von deren Kalkkomponente man eine verhältnismäßig rasche Reaktion erwarten durfte, erwies sich als schwierig. Denn unvorhersehbar wurde nach Programmbeginn die Intensität der Emissionsquelle abgeschwächt, weshalb sich zwangsläufig der Schwerpunkt der Untersuchung auf Proben vom Bauwerk verlagerte, in denen ja die Effekte längerer Expositionszeiten aufsummiert worden waren. Einflüsse von SO₂, NO_x und Chlorid finden ihren Niederschlag aber nicht nur im Konzentrationsgefälle mit der Eindringtiefe, sondern hängen besonders von lokalen Umständen, wie Himmelsrichtung, Entnahmehöhe am Bauwerk und Orientierung gegenüber der Emissionsquelle, ab. Entsprechende Tiefenprofile zeigen neben Unterschieden in der Verteilung der Reaktionsprodukte als Ausdruck von Chemismus und Oberflächenrauheit des Materials auch damit korrelierbare Veränderungen des Porenraums und demzufolge der physikalisch-technischen Eigenschaften und Merkmale, mit welcher Zielsetzung übrigens auch die Auslagerungsversuche noch mehrere Jahre fortgesetzt werden sollen. Unterstützung findet diese Aufgabe in der experimentellen Erfassung der Depositionsgeschwindigkeit und Aufnahmezeit von SO₂ bei verschiedenen Gaskonzentrationen. Da das Verwitterungsverhalten im wesentlichen vom Materialgefüge, also von dessen Transport- und Speichereigenschaften für Feuchtigkeit abhängt, ist durch Variation der Mörtelkomponenten in bezug auf Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung des Zuschlags und Wasserbedarf sowie der Rohdichte der Ziegel versucht worden, deren Einfluß auf Kapillarität und Wasserabgabe eines Mauerwerks zu ermitteln.

Abstract

Quantifying the effect of air pollutants on renderings

It has proved to be difficult in establishing dose-response relations during attack by an atmosphere containing oxides of sulphur and nitrogen on outdoor-exposed but rain-water sheltered plates made of different renderings, from whose lime component a relatively quick reaction could be expected. Following the program's start, the intensity of the emission source was suddenly attenuated, and so the focus of investigations necessarily shifted to samples taken from buildings, in which the effects of long exposure periods had become additive. Influences of SO₂, NO_x and chloride, however, result not only in concentration gradients with penetration depth but depend especially upon local conditions such as cardinal point, sampling height on building, and orientation towards the emission source. Corresponding depth profiles indicate, besides differences in distribution of reaction products as an expression of a material's chemistry and surface roughness, also correlating changes in its pore space and consequently in its physico-technical characteristics. Exposure tests shall still be continued for several years with the same objective. Such a task finds support by experimental determination of deposition velocity and uptake rate for SO₂ at various gas concentrations. Since weathering behaviour mainly depends on a material's structure, i.e. on its characteristics to store and transport moisture, it was attempted to quantify the influence on capillary action and water release of a masonry by varying rendering components with regard to binder content, grain-size distribution and water demand as well as to bricks' apparent density.

Sommaire

Comment quantifier l'effet des polluants atmosphériques sur des enduits

Il s'est avéré difficile d'établir des relations dose-effet lors de l'attaque d'une atmosphère contenant des oxydes de soufre et de nitrogène qui ont lieu sur des plaques à enduits de types différents exposées à l'air libre, mais à l'abri de la pluie. Ainsi, au commencement du programme, l'intensité de la source émettrice diminua soudain, et, de la sorte, le point capital de l'étude se transféra sur des échantillons au bâtiment même, où sont accumulés les effets dus à des temps prolongés d'exposition. Les influences du SO₂, du NO_x et du chlorure trouvent non seulement leur expression dans le gradient de concentration relatif au degré de pénétration, mais dépendent spécialement aussi de circonstances locales telles que le point cardinal, la hauteur de prélèvement au bâtiment et l'orientation vers la source émettrice. Des profils de profondeur correspondants présentent, outre des différences dans la répartition des produits de réaction, en tant que marque du chimisme et de la rugosité de surface du matériau, aussi et surtout des changements de l'espace poreux pouvant être mis en corrélation avec celles-là et, pour cette même raison, des modifications des caractéristiques. C'est avec cet objectif qu'on envisage d'ailleurs de poursuivre les essais d'exposition encore plusieurs années. Ce projet s'appuie sur la détermination expérimentelle de la vitesse de déposition et le taux de SO₂ absorbé à des concentrations différentes de gaz. Comme le comportement à l'altération dépend prédominamment de la structure du matériau, donc de ses qualités de stockage et de transfert d'humidité, on a essayé de déterminer leur influence sur la capillarité et le dégagement d'eau d'une maçonnerie en modifiant les composants d'enduit relatifs à la teneur en liant, à la répartition des grains d'agrégat et au besoin d'eau, ainsi que la densité apparente des briques.

¹⁾ Hiermit liegt eine erweiterte und überarbeitete Fassung des Abschlußberichts zu dem im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) durchgeführten Projekt 108 07 013/02 "Substanzerhaltung historischer Mauerwerksbauten, Quantifizierung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Baustoffe, besonders auf Außenputz", Juni 1994, vor.

Inhaltsverzeichnis	Seite	
1	Einleitung und Problemstellung	7
2	Probenherstellung	9
2.1	Versuchstechnisches	9
2.2	Ausgangsstoffe	10
2.2.1	Bindemittel	10
2.2.2	Mörtel	11
3	Der Baustoff Mörtel und die Entwicklung seiner Gefügemerkmale	14
4	Kennzeichnung des Materials und seiner Veränderung	19
4.1	Probenahme und Präparation	19
4.2	Porenraumbezogene Eigenschaften und Merkmale	20
4.2.1	Über die Einsatzfähigkeit der Prüfverfahren	20
4.2.1.1	Porengrößenverteilung (Quecksilberporosimetrie)	20
4.2.1.2	Kapillare Wasseraufnahme	22
4.2.1.3	Wasserdampfdurchlässigkeit	23
4.2.1.4	Spezifische Oberfläche (Gasadsorption)	24
4.3	Mechanische Festigkeit	25
4.3.1	Verschleiß	25
4.4	Chemische Zusammensetzung	28
4.4.1	Analysenverfahren	28
4.4.1.1	Gravimetrische Analyse	28
4.4.1.2	Coulometrische Titration	28
4.4.1.3	Ionenaustausch-Chromatografie	29
5	Ergebnisse	31
5.1	Ermittlung der Depositionsgeschwindigkeit und der Aufnahmerate von SO ₂ für Mörtel nach der Kammermethode	31
5.2	Auslagerung von Mörtelproben über einen Versuchszeitraum von 17 Jahren	33
5.3	Richtungsabhängige Veränderungen von Putzmörteln als Folge unterschiedlicher Expositionsbedingungen am Bauwerk	37
5.4	Höhenabhängige Veränderungen in Putzmörteln am Bauwerk	41
5.5	Auslagerung der Baustoffe an Orten mit unterschiedlicher Schadstoffbelastung	45
5.5.1	Charakterisierung der Ausgangsmaterialien	45
5.5.2	Zeitabhängige Veränderungen	46
5.5.3	Einfluß der Expositionsbedingungen auf das Materialverhalten	49
5.6	Untersuchungen zum Einfluß der Mörtelkomponenten (Sand, Bindemittel und Anmachwassergehalt) auf die physikalisch-technischen Kennwerte	50
5.6.1	Sande (Mörtelzuschlag)	50
5.6.2	Kalkmörtel	52
5.6.3	Mauerausschnitte	54
6	Zusammenfassung	60
7	Danksagung	62
8	Schrifttum	62

1 Einleitung und Problemstellung

Die Hauptaufgabe dieses Forschungsvorhabens besteht darin herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Immissionsrate von Luftverunreinigungen und dem Schädigungsgrad eines Baustoffs besteht, sich also eine sogenannte Dosis-Wirkungs-Beziehung aufstellen läßt. Würde sich das bestätigen, wäre von Interesse, in welchem Umfang dessen physikalisch-technische Eigenschaften sowie Gefügemerkmale als Folge unterschiedlicher Schadstoffkonzentrationen einer Veränderung unterliegen und ob sich die entsprechenden Einflüsse z. B. von SO_2 und NO_x quantitativ erfassen lassen. Hierbei sind die Versuchsbedingungen durch die an verschiedenen Orten mit unterschiedlichen Klimaten errichteten Freilagerungsgestellen vorgegeben. Dort werden unter anderem Immission, Temperatur und relative Umgebungfeuchte mit Hilfe von unmittelbar benachbarten Meßstationen kontinuierlich erfaßt. Beim Probematerial handelt es sich in der Regel um Putzmörtel, deren Oberfläche nachträglich aufgeraut worden ist (Kratzputz), um der Entstehung einer dichtenden Schlammeschicht von vornherein entgegenzuwirken. Ein sandiger Kalkstein (Baumberger "Sandstein") ergänzt das Versuchsprogramm. Die für eine messende Kennzeichnung des Ausgangsmate-

rials vorgesehenen Methoden und Verfahren sind mit Erfolg erprobt und erweitert worden. Analog zu einer thematisch ähnlichen Arbeit über Natursteine [72] hat man auch im vorliegenden Fall Wert darauf gelegt, möglichst viele Materialeigenheiten zu erfassen, damit nicht etwa eine erfolgversprechende Korrelation übersehen würde (siehe *Tabelle 1*). Dies ist besonders wichtig in Anbetracht der zusätzlichen Erschwernisse, die naturgemäß ein Material mit sich bringt, das bei verhältnismäßig geringer Schichtdicke zudem meist noch ziemlich bröckelig ist. Hinzu kommen die herstellungsspezifischen, keinesfalls nur durch das Aufbringen bedingten Inhomogenitäten. Da sich von 1977 bis 1988 die mittleren Jahreskonzentrationen von SO_2 ungefähr auf die Hälfte erniedrigt haben (vgl. *Bild 1*), ist im Hinblick auf die Wahl der Plätze für die beabsichtigte Auslagerung besondere Sorgfalt geboten gewesen, und zwar in dem Sinne, daß auch Stellen in unmittelbarer Nähe der Emittenten von SO_2 und NO_x ausgesucht worden sind. Gleichzeitig haben sich die Konzentrationen an den einzelnen Meßstationen bzw. Auslagerungsorten einander angeglichen. Diese Tendenz setzte sich neuerdings fort (siehe *Bild 2*).

Tabelle 1: Zur Beurteilung von porösen Baustoffen herangezogene Materialkennwerte sowie Verfahren zu deren Bestimmung

Begriff	Kenndaten	Verfahren
Verwitterungssimulation	Maßstabsfaktor p_1 der durch die <i>W e i b u l l</i> - Beziehung erfaßten Masseverlustkurve als Funktion der Zyklenanzahl	Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat (in Varianten)
Porenfüllungsgrad	Sättigungswert S_s , "relativer Imprägnierungsgrad" S_t kritischer Sättigungsgrad S_{cr}	Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck und bei 15 MPa, kapillarer Flüssigkeitsaufstieg relative Längenänderung bei Befrosten
Porengrößenverteilung	spezifisches Porenvolumen, diskrete Werte (z.B. Mikroporosität, d_{10m} - Wert, Intervall nach <i>R a v a g l i o l i</i> ; Feldkapazität) spezifische Oberfläche Σ_m	Quecksilber- Porosimetrie, Beziehung Wasserspannung / Wassergehalt, Physisorption
Feuchtigkeitsgehalt	Wasserkapazität Ψ_k , offene Porosität ϵ_o , Rohdichte ρ	kapillarer Flüssigkeitsaufstieg, Wasseraufnahme, Unterwasserwägung
Feuchtigkeitstransport	Wasseraufnahme-Koeffizient w_o	kapillarer Flüssigkeitsaufstieg
durchgängige Porosität	spezifische Gasdurchlässigkeit D_s , Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ	Fluidtransport bei definiertem Druck- bzw. Konzentrationsgefälle
Verdunstung	Masseverlust als Funktion der Zeit	Verdunstungsverlauf durch Wägung
mechanische Eigenschaften	"Trocken"- und "Naß"-Druck- und Biegezugfestigkeit, E-Modul, Oberflächenhärte ("Makrohärte"), Oberflächenverschleiß, thermischer Ausdehnungskoeffizient	Druckversuch, Biegeversuch, Schwingverhalten, Kugeleindruck, Schleifverschleiß, relative Längenänderung

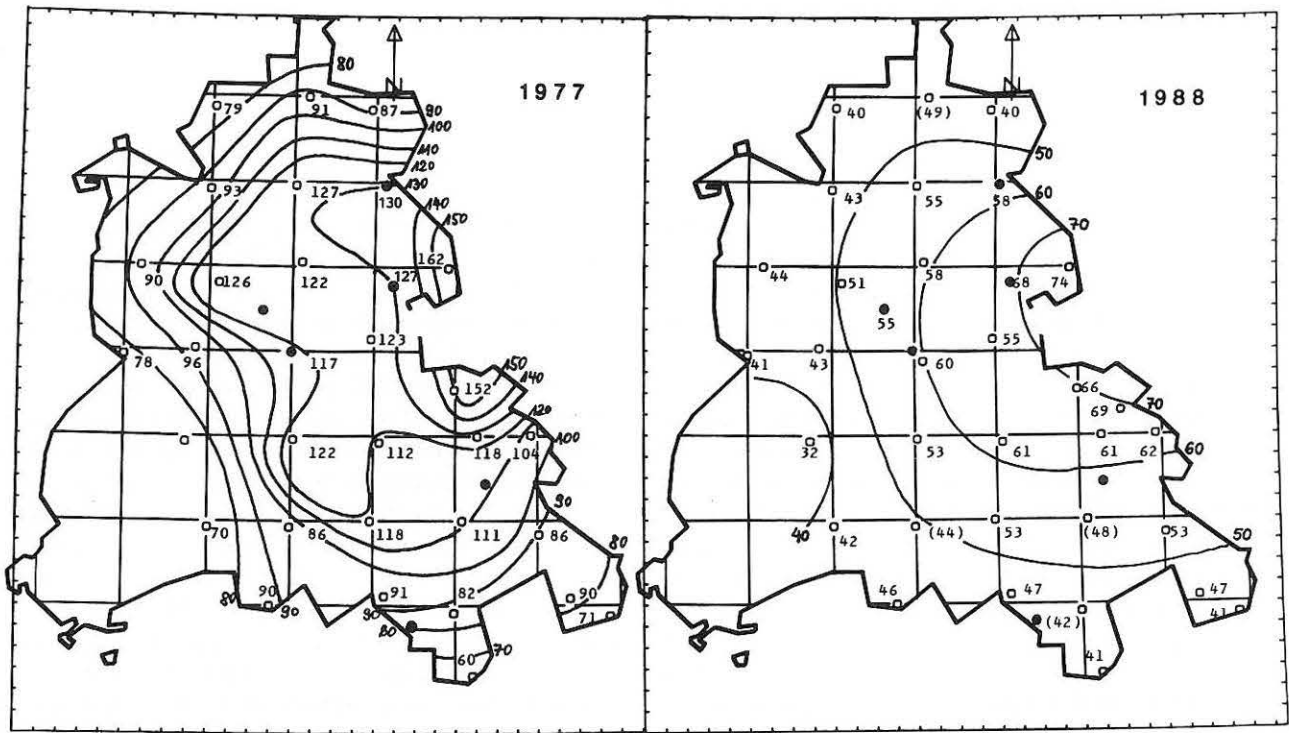


Bild 1: Berliner Luftqualitätsmeßnetz: Vergleich von Jahresdurchschnitten der SO_2 -Konzentration in $\mu g/m^3$ für 1977 und 1988 sowie die Angabe der Plätze (schwarze Punkte), an denen sich die Auslagerungsstelle befinden

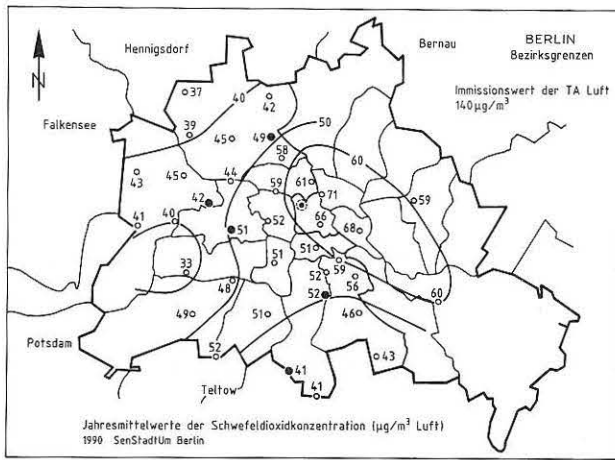


Bild 2: Luftmeßnetz von Berlin: Karte der Jahresdurchschnittskonzentration von SO_2 (in $\mu g/m^3$ Luft) für 1990

Die SO_2 -Konzentration im ersten halben Jahr 1991 betrug sogar nur noch $59 \mu g/m^3$ Luft am Ort mit der höchsten und $38 \mu g/m^3$ an demjenigen mit der niedrigsten Schadstoffbelastung und sank im entsprechenden Zeitraum 1992 auf $49 \mu g/m^3$ bzw. $23 \mu g/m^3$ Luft. Dies gilt ebenso für NO_x , wenn auch nicht in dem gleichen Ausmaß. Dieser weitere Abfall ist offensichtlich durch die Stilllegung von SO_2 -Emittern im Gebiet der früheren DDR verursacht worden. Durch diese eigentlich positive Entwicklung der Luftqualität verschlechtern sich aber die Chancen, in absehbarer Zeit deutliche Veränderungen an den ausgelagerten Baustoffen nachzuweisen. Die Entnahmeabstände müssen verändert werden, was bedeutet, daß die nächste Probenahme frühestens im Juli des Jahres 1995 erfolgen konnte.

Was die Unterschiede zwischen den Standorten anbetrifft, so ist zu erwarten, daß diese zunehmend von der Schwankungsbreite der Einzelergebnisse überlagert und somit keine große Aussagekraft mehr besitzen werden. Möglicherweise erklären sich voneinander abweichende Ergebnisse hauptsächlich durch andere örtlich schwankende Einflüsse wie Frost/Tau-Wechsel-Zyklen, Betauungsmöglichkeiten, Wind etc., was sinngemäß auch für die NO_x -Emittern gilt. In Bild 3 sind die SO_2 - und NO_x -Konzentrationen an verschiedenen Orten dargestellt.

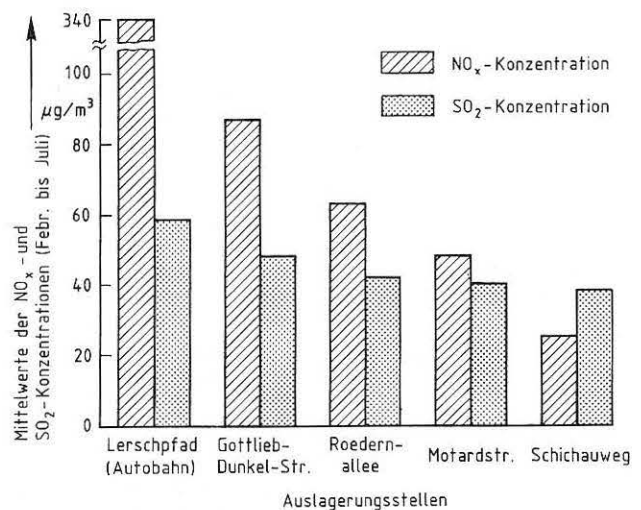


Bild 3: Vergleich der mittleren NO_x - und SO_2 -Konzentrationen (in $\mu g/m^3$ Luft) an verschiedenen Auslagerungsorten in Berlin von Februar bis Juli 1991

Zwangsläufig mußte daher das ursprüngliche Arbeitsprogramm mit Schwerpunkt auf die Freilagerung zugunsten einer mehr auf die in situ-Befunde an älteren Bauwerken gerichteten Forschung verlagert und das Augenmerk auf die Analyse von Putzschalen an vor vielen Jahren hergestellten Fassaden gerichtet werden, in denen ein Verwitterungsprofil hatte entstehen können.

Was entsprechende Ergebnisse anbetrifft, liefert ein Großteil der Diagramme eben nicht immer klare Gesetzmäßigkeiten, die eine Verallgemeinerung rechtfertigen würden. Vielmehr handelt es sich manchmal um nicht beliebig wiederholbare Einzelresultate, die teilweise unter außergewöhnlichen Bedingungen, wie z. B. Einschränkungen bei der Probenahme, Verlust des Probematerials durch Zerbröckeln vor dem Versuch, offensichtliche Heterogenität über das bemusterte Volumen und demzufolge fehlende Reproduzierbarkeit zustande gekommen sind. Denn von den chemischen Analysen einmal abgesehen, für die in der Regel einigermaßen repräsentative Proben vorgelegen haben, zeigt sich dies auch bei so mancher Bestimmung physikalisch-technischer Kenngrößen. Das aber erfordert Kompromisse, so daß sich mitunter allenfalls Tendenzen angeben lassen, deren Absicherung eigentlich einer wesentlich erweiterten Anzahl von Versuchen bedurft hätte. Derartige Schwierigkeiten - im Verlaufe des Programms häufig unvermeidlich - sollen jedenfalls nicht verschwiegen werden.

2 Probenherstellung

2.1 Versuchstechnisches

Was die Konstruktion der Auslagerungsgestelle und die Probekörperbefestigung für die Freibewitterung anbetrifft, so finden verschiedene Gesichtspunkte Berücksichtigung. Die an Außenflächen eines Gebäudes befindlichen Baustoffe werden im Gegensatz zu einer freistehenden Säule keineswegs von allen Seiten gleichmäßig den Luftverunreinigungen ausgesetzt. Auch weiß man von der SO_2 -Verwitterung seit langem, daß sie an den vor Regen geschützten Stellen besonders intensiv ist, weil dort weniger die Gefahr des Auslaugens und Abtransports der Reaktionsprodukte besteht. Für den beabsichtigten Zweck sind daher bereits früher bewährte überdachte und seitlich mit Faserzementwellplatten verkleidete Stahlrohgestelle herangezogen worden ([85], vgl. Bild 4). Wie aus Bild 5 hervorgeht, bestehen die auf den Gerüsten verwendeten Klemmvorrichtungen aus verschiedenen Metallteilen, welche die Grundplatten für die Probekörper (20 cm x 15 cm sowie 15 cm x 10 cm) senkrecht halten. Darauf befindet sich als Spritzbewurf, der das Putzmörtelsystem mit der Faserzementplatte verbinden soll, grober Sand auf einem vorher aufgetragenen Epoxidfilm. Der Frischmörtel wird aufgetragen, wobei die Einzelplatten durch entsprechende Schablonen ihr Format erhalten. Danach erfolgt das Kratzen der Frischmörteloberflächen, und zwar einen Tag nach dem Aufbringen. Dadurch wird



Bild 4: Gestell für die Freibewitterung von Putzmörteln

ein unkontrollierbarer Einfluß infolge der Anreicherung von Feinmörtel vermieden, der das Eindringen der aggressiven Gase behindern könnte. Außer den Mörtelplatten stehen besondere Probekörper in Zylinder- bzw. Scheibenform für die Versuche zur Ermittlung von Verschleißverhalten und zur Wasserdampfdurchlässigkeit zur Verfügung. Eine 90tägige Vorlagerung der Proben bei erhöhter Luftfeuchte (90 % r.F. bei 20 °C) ist zweckmäßig erschienen, um deren Stabilität als Folge des Erhärtungsvorgangs zu fördern. Dies geschieht auch mit dem Ziele, die CO_2 -Aufnahme vor dem Kontakt der Probekörper mit der SO_2 -haltigen Außenatmosphäre möglichst weit voranzutreiben, indem diese so räumlich und zeitlich mehrfach den günstigsten Bedingungen für die Carbonatisierungsreaktion unterworfen werden. Danach dichtet man die erhärteten und transportfähigen Proben mit einem Polymer seitlich ab, um das Eindringen von Feuchtigkeit aus dieser Richtung zu vermeiden. Derart werden die Ausgangsbedingungen für alle Proben vereinheitlicht, so daß nunmehr mit zunehmender Zeit eine bessere Ausprägung der Konzentrationsprofile gewährleistet ist.

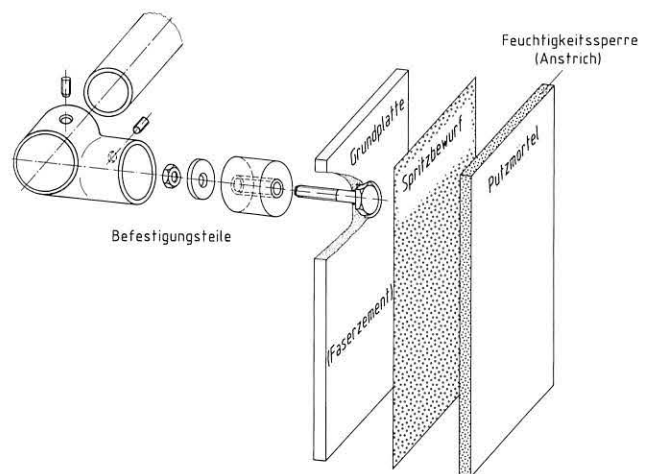


Bild 5: Klemmvorrichtung zum Anbringen von Putzmörteln auf einem Freibewitterungsgestell, als Explosionsschaubild dargestellt

2.2 Ausgangsstoffe

2.2.1 Bindemittel

Um der Zusammensetzung historischer Putzmörtel nahezu- kommen, die in der Regel geringere Anteile an Hydraulfaktoren enthalten als ihre derzeitigen Äquivalente und um die lokale Entstehung dünner Zementschlammefilme zu umgehen, wurden als Bindemittel vorzugsweise Hydrationsprodukte von reinen Kalken und Dolomit herangezogen. So ließen sich die Ausgangsbedingungen vereinfachen, gleichzeitig aber auch zielgerichtet verändern. Beabsichtigt man ein vergleichbares Verhalten der verschiedenen Putzmörteltypen gegenüber dem Angriff von gasförmigen Schwefeldioxid bzw. dem entsprechenden Aerosol, ist als Grundlage für die Berechnung der Mischungsverhältnisse ein volumenmäßig gleicher $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt im Baustoff und damit an der der Atmosphäre zugewandten Oberfläche wünschenswert. Da die Wahl auf drei verschiedenartige Luftkalken und einen hydraulischen Kalk fiel - darunter ein industriell gelöschter und ein Sumpfkalk, deren Rohstoff

geologisch aus derselben Stufe stammt - einen hydratisierten Dolomitmalk sowie einen hydraulischen Kalk, stand man also vor der Aufgabe, jeweils einen volumenvergleichbaren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt in die Mörtelmischung einzubringen. Deshalb war es im Fall des Dolomitmalkhydrats erforderlich, dessen MgO - und $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -Gehalte entsprechend den stöchiometrischen Verhältnissen in ein Calciumhydroxid-Äquivalent zu "übersetzen". Zu diesem Zweck wurde $\text{Mg}(\text{OH})_2$ erst einmal in MgO umgerechnet sowie außerdem CaCO_3 in $\text{Ca}(\text{OH})_2$, weil man hier ja in bezug auf den SO_2 -Angriff einen ähnlichen Effekt erwarten durfte. Solcher Art und unter Berücksichtigung der in jedem Produkt enthaltenen Verunreinigungen ergab sich ein massebezogenes Verhältnis gegenüber der Zuschlagmenge von 1 : 3,1 (oder 1,0 für das getrocknete Äquivalent) : 1,1 entsprechend Kalkhydrat : Sumpfkalk : Dolomitmalkhydrat. Darüber hinaus lassen sich Anhaltspunkte über den Mineralphasenaufbau im Sinne einer Modalanalyse aus der Histogrammdarstellung *Bild 6* sowie die chemische Zusammensetzung aus *Tabelle 2 und 2a* entnehmen.

Bild 6: Mineralphasenaufbau, errechnet für die betreffenden Bindemitteltypen

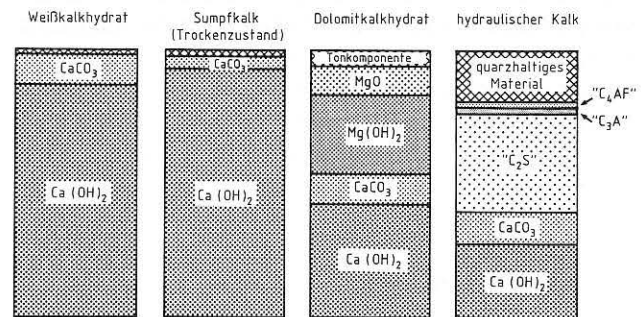


Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der (glühverlustfreien) Luftkalken bzw. von hydraulischem Kalk und Baumberger "Sandstein", die in diesem Vorhaben Verwendung finden

Bestandteile	Masseanteil in %		
	Industriell gelöschter Kalk	Sumpfkalk (vorgetrocknet)	Dolomitmalk
In Salzsäure unlösliche Anteile	0,60	0,31	3,57
in Salzsäure lösliche Kieselsäure SiO_2	1,66	0,70	1,88
Summe der Oxide R_2O_3 ¹⁾	0,74	0,64	1,64
Calciumoxid CaO	96,12	97,43	54,41
Magnesiumoxid MgO	0,58	0,71	38,27
Kaliumoxid K_2O	0,04	0,01	0,09
Natriumoxid Na_2O	0,05	0,05	0,11
Sulfat SO_3	0,08	0,05	0,03
entsprechend $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,17	0,11	0,06
Gesamtschwefel entsprechend Sulfat SO_3	0,08	0,05	0,03
Summe	99,87	99,90	100,00
Chlorid Cl^-	0,01	0,01	0,07
Nitrat NO_3^-	n.n.	n.n.	n.n.
Nitrit NO_2^-	n.n.	n.n.	n.n.
(Rest, rechnerisch)	0,12	0,09	---

¹⁾ Aluminiumoxid Al_2O_3 , Eisenoxid FeO_3 , Titandioxid TiO_2 (n.n. = nicht nachweisbar)

Tabelle 2a (Fortsetzung):
Chemische Zusammensetzung der (glühverlust-freien) Luftkalke bzw. von hydraulischem Kalk und Baumberger "Sandstein", die im Vorhaben Verwendung finden

Bestandteile	Hydraulischer Kalk ("Billerbecker Kalk")		Baumberger "Sandstein"	
	Masseanteile in %		Masseanteile in %	
Glühverlust, 1000 °C		--		--
In Salzsäure unlösliche Anteile		20,72		53,26
lösliche Kieselsäure	SiO ₂	13,59		2,11
Summe der Oxide	R ₂ O ₃	3,35		1,83
davon				
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃		1,39	
Eisenoxid	Fe ₂ O ₃		0,33	
Titandioxid	TiO ₂		0,11	
Calciumoxid	CaO	59,49		42,27
Magnesiumoxid	MgO	1,07		0,37
Kaliumoxid	K ₂ O	0,12		
Natriumoxid	Na ₂ O	0,07		
Sulfat entsprechend	SO ₃ CaSO ₄ · 2H ₂ O	1,44 3,10		0,10 0,22
Gesamtschwefel entsprechend Sulfat	SO ₃	1,42		0,08
Summe		99,85		99,94
Sulfit	SO ₃ ²⁻	n.n.		n.n.
Sulfid	S ²⁻	n.n.		n.n.
Chlorid	Cl ⁻	< 0,01		< 0,01
Nitrat	NO ₃ ⁻	n.n.		n.n.
Nitrit	NO ₂ ⁻	n.n.		n.n.
Rest (nicht bestimmt)				

(n.n. = nicht nachweisbar)

2.2.2 Mörtel

Die Materialdaten der Mörtel sowie weitere, z.B. die Herkunft der Bindemittel betreffenden Angaben, sind aus Tabelle 3 ersichtlich. Über die darin aufgeführten Materialien hinaus haben ein Kalkmörtel mit Zementzusatz und eine entsprechende Mischung mit Dolomitkalk Verwendung gefunden. Das Mischungsverhältnis (Kalk : Zement : Zuschlag in Masseanteilen) betrug 1 : 0,6 : 16,3 bzw. 1 : 0,6 : 18,3 bei einem Ausbreitmaß von 18 cm und das Wasserrückhaltevermögen 86,3 bzw. 88,3 %.

Nach dem Aufbringen des Frischmörtels auf die Basisplatte beginnt sofort der Erhärtungsvorgang. Im Frühstadium ist die Trocknung ausschlaggebend, die durch Annäherung der Kalkhydratteilchen zu einer Schrumpfung

und Verfestigung des kryptokristallin vorliegenden Calciumhydroxids führt. Anschließend bzw. parallel dazu verläuft die carbonatische Erhärtung. Es handelt sich dabei um einen vielschichtigen Vorgang, da die eigentliche Festigkeitsentwicklung erst durch wiederholte Auflösung und Ausfällung - verbunden mit Umkristallisation - vonstatten geht (vgl. [42]). Im Falle der hier vorzugsweise Kalk enthaltenden Mörtel liegt ihrer Erhärtung zwar die chemisch verhältnismäßig einfache Reaktion einer Überführung des Kalkhydrats in Carbonat unter Wasserabgabe zugrunde, worauf eine Kristallvergrößerung [60] folgt, bei der vor allem CO₂-haltiges Wasser zum zwischenzeitigen Auflösungsprozeß beiträgt. Die bestimmenden Faktoren für die erstmalige Entstehung des Bindemittel/Zuschlag-Gerüsts und somit dessen geometrische Anordnung einschließlich der Anlage des später so bedeutungs-

Tabelle 3: Kenndaten der Putzmörteltypen, die in diesem Vorhaben Verwendung finden

Bindemittel	Typ	Vorkommen	Rohstoff			Mörtelmischung			
			Geologische Herkunft	Mineralphasen	Rohdichte ρ in kg/dm ³	Spezifische Oberfläche Σ_m in m ² /kg	Mischungsverhältnis in Masseanteilen	Ausbreitmaß in cm	Wasserhaltevermögen
industriell gelöschter Kalk	Massenkalk	Painten bei Kelheim/Donau, Bayern	Malm $\epsilon - \zeta$	Ca(OH) ₂ , CaCO ₃	0,42	16230	1 : 16,3 ¹⁾	17,0 ²⁾	84,1 ³⁾
Sumpfkalk	Massenkalk	Altmannstein bei Kelheim, Bayern	Malm $\epsilon - \zeta$	hochdisperses Ca(OH) ₂ , CaCO ₃	1,32	31400	1 : 5,6 ¹⁾	16,5 ²⁾	88,9 ³⁾
Dolomitmalk	Dolomit	Scharzfeld/ Harz, Niedersachsen	Mittlerer Zechstein, Hauptdolomit	Ca(OH) ₂ , MgO, Mg(OH) ₂ , CaCO ₃ , Quarz	0,55	12310	1 : 18,7 ¹⁾	17,2 ²⁾	89,0 ³⁾
hydraulischer Kalk	Kalk	Billerbeck bei Münster, Westfalen	Oberkreide	C ₂ S, Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , Quarz	0,65	4780	1 : 7,8 ¹⁾	18,2 ²⁾	84,7 ³⁾

1) Normsand gemäß DIN EN 196 Teil 1 [17]

2) gemäß DIN 18 555 [11]

3) gemäß ASTM C 91 [1], jedoch bei einem Restdruck von 8,16 Pa (= 60 mm Hg) anstatt 50,8 mm Hg

vollen Porensystems stellen jedoch die Vorgänge von Transport und Verdunstung des Wasseranteils dar, in dem ursprünglich Ca(OH)₂ in Suspension bzw. Lösung vorgelegen hat.

Von der pauschalen Zusammensetzung her würde es vielleicht genügen, ein definiertes, vor dem Versuch ausprobiertes Mischungsverhältnis einzuhalten, was jedoch bei weitem nicht allen Erfordernissen Rechnung trüge. Es sind dies: die Gleichmäßigkeit der Verteilung von Zuschlag und Bindemittel, die Dispersität der Kalkkomponente, die Benetzung der Zuschlagkörner sowie die durch das Aufbringen erfolgende Verdichtung, mit deren Hilfe - im ganzen gesehen - eine Reproduzierbarkeit des Putzmörtels überhaupt erst sichergestellt werden kann. Natürlich ist eine vollkommene Gleichförmigkeit nicht zu erreichen, da auch unbeabsichtigte Einflüsse bei der Herstellung sowie Langzeitfaktoren, wie etwa die Art der Carbonatisierung, heterogene Bereiche in einem solchen mindestens aus zwei Festkomponenten und dem Porenraum bestehenden System erzeugen können. Auf diese Weise geben auch Unterschiede in der Bindemittelerhärtung Anlaß zu verschiedenen Typen des Materialzusammenhalts, was hier jedoch unberücksichtigt bleiben muß. Die zahlreichen Möglichkeiten, den Kalkmörtel durch unterschiedliche Dosierung der Ausgangsstoffe und zwischenzeitliche Behandlung im Verlauf von Herstellung und Lagerung im Hinblick auf Eigenschaften bzw. Merkmale zu modifizieren, sind seinerzeit von Graf [24] beschrieben worden, als dessen Verdienst es übrigens anzusehen ist, daß die Prüfung von Baukalk in eine dem Material gerecht werdende Normung Eingang gefunden hat. Eine mangelnde Eignung hinsichtlich Mischungsverhältnis und Homogenisierung der Komponenten, Wasserzugabe und Vornässen des

angrenzenden Bausteins bis hin zu Fehlern beim Ein- bzw. Aufbringen des Mörtels und dessen Nachbehandlung während der Festigkeitsentwicklung finden eigentlich erst im Endprodukt ihren Ausdruck. Deshalb könnte auch die Mühe lohnen, dies anhand von im nachhinein gewonnenen "Fingerabdrücken" rückzuverfolgen, sofern keine Zusätze zur Veränderung der Verarbeitungseigenschaften eingebracht worden sind, die das Bild unnötig komplizieren. Demnach werden die Versuchsergebnisse von mehreren Faktoren beeinflusst, was allerdings kaum einer Ableitung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten im Wege stehen dürfte. Bei den geschilderten Schwierigkeiten mag es sich um wesentliche Fehlerquellen im Sinne einer wohldefinierten Präparation handeln, die allerdings schon von Interesse für ein Gebiet sind, auf dem eher die empirischen Erfahrungen überwiegen. Jedenfalls ist Homogenität schon ein wesentliches Kriterium für den Ausgangszustand, der letztlich den weiteren Verlauf der Reaktion bestimmt. Einen Eindruck davon, wie man sich eine entsprechende Verteilung der durch die Sulfatisierungsreaktion entstandenen Salzablagerungen vorzustellen hat, vermitteln übrigens auch an Ziegelmauerwerk erhaltene Ergebnisse [38]. Wer mit der landläufigen Ausdrucksweise zufrieden ist, daß sich Frischmörtel auf seiner Unterlage "verkrallt", dem sollte man klarmachen, wie wenig allerdings die tatsächlich ablaufenden Vorgänge diese Idealvorstellung erfüllen, auch wenn das an Calciumhydroxid gesättigte Mörtelwasser ungehindert da hinein vordringen kann. Wie mühselig es jedenfalls ist, Flächen mit entsprechendem, nicht punktförmigen Kontakt im Mikrobereich zu finden, wird deutlich, wenn man in einem Anschliff beispielsweise nach geeigneten Partien der Grenze zwischen Mörtel und Mauerziegel sucht (vgl. [63], [70]).

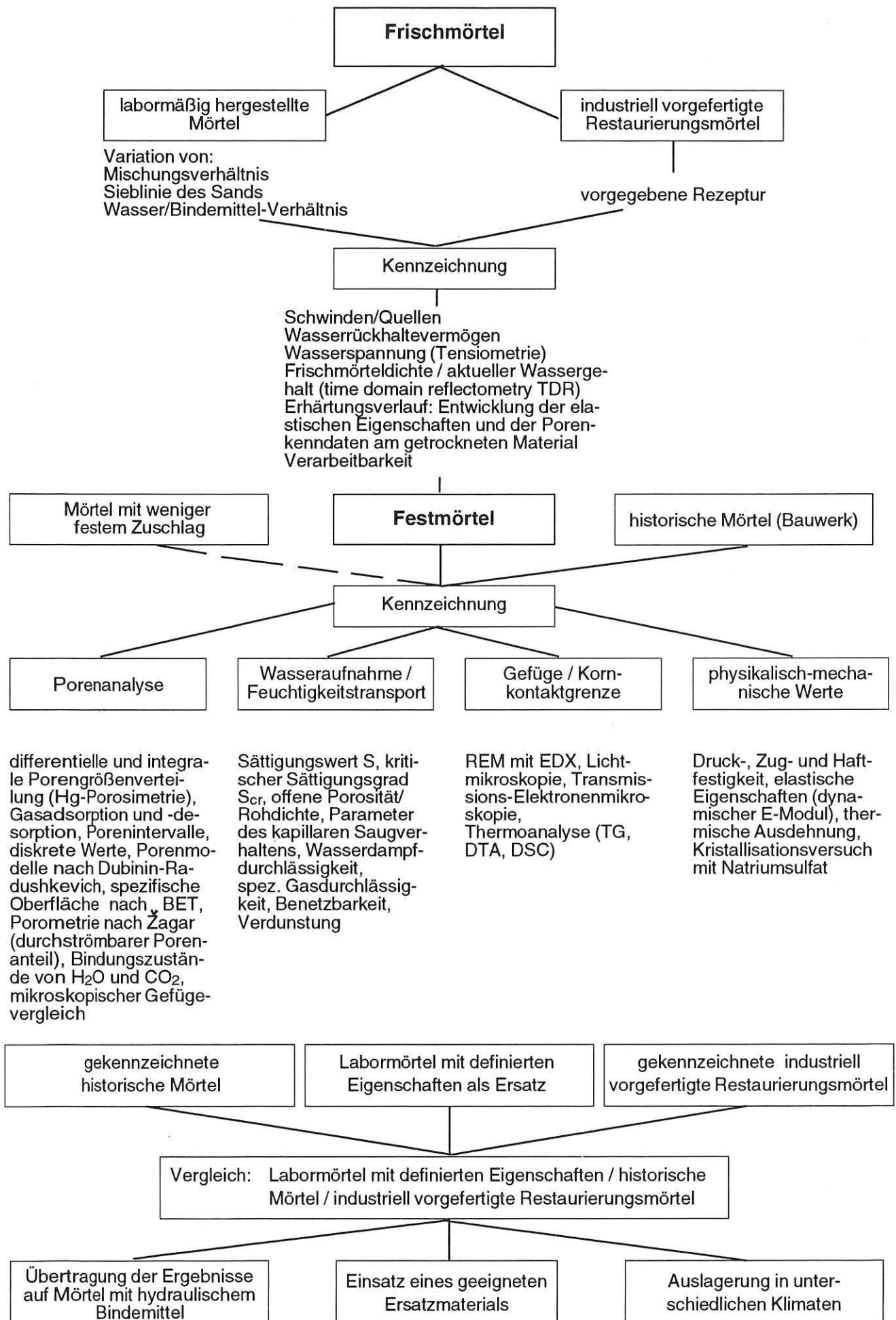


Bild 7: Schema von vorstellbaren Untersuchungen zur Mörtelkennzeichnung

Es hatte mit Anbruch des Industriezeitalters auch eine Weiterentwicklung der Mörteltechnik gegeben. So konnte man Mängeln, die etwa durch Reste ungelöschten Kalks aus dessen unvollständigem Aufschluß beim Einsumpfen verursacht wurden, mit Hilfe des industriellen Löschprozesses entgegenwirken. Auf diese Weise kam man in der Regel zwar zu einer gleichmäßigeren Gebrauchsmischung, manchmal jedoch auch zu niedrigeren Festigkeitswerten des Endprodukts. Auch fehlte es nicht an Versuchen, die sich mehr auf praktischen Erfahrungen stützende Mörtelbereitung, wie sie vor allem in früheren Zeiten betrieben worden war, vom Ruch der Unwissenschaftlichkeit zu befreien. Neuere Erkenntnisse über den Einsatz von Verfahren zur Charakterisierung von Frisch- und Festmörteln (vgl. [79]) haben dann dem Materialprüfer Werkzeuge an die Hand gegeben, eine nicht ausnahmslos von Empirie bestimmte Forschung ganz anders als bisher voranzutreiben, und zwar mit dem Ziele, etwas mehr Licht in das Dunkel der seit Jahrzehnten vernachlässigten Materie zu bringen. So stößt man noch allenthalben auf Anzeichen von Unsicherheit, auch wenn es sich beispielsweise um das in *Bild 7* gezeigte Fließschema handelt. Wie weit man von einer gezielten, d.h. auf den Erhalt kontrollierter Eigenschaften angelegten Mörtelherstellung entfernt ist, soll eine Arbeit [67] verdeutlichen, die auch den Nachholbedarf an Grundlagenforschung auf diesem Gebiet offenlegt.

3 Der Baustoff Mörtel und die Entwicklung seiner Gefügemerkmale

Ein mineralischer Baustoff wie der Putzmörtel läßt sich u.a. durch den in die Matrix eingebetteten, überwiegend offenen und auch durchgängigen Porenraum kennzeichnen. In einem solchen, einigermaßen homogenen Material spielen beim Feuchtigkeitstransport neben Speicherung auch Diffusion, Kapillaraufstieg und Verdunstung eine Rolle, sofern ein örtlicher Gradient als treibende Kraft wirksam ist. Wenn nicht Anisotropien durch Genese bzw. Herstellung hervorgerufen worden sind, können sich darin Flüssigkeiten in allen Richtungen gleichartig bewegen. Handelt es sich um die Bauwerksfeuchtigkeit, transportiert diese gelöste Salze und Bindemittelbestandteile im Porenraum und scheidet sie an vorgegebenen Stellen wieder ab, wobei auf lange Sicht im Mörtel verdichtete Zonen mit einer Anreicherung an Bindemittel bzw. Salzen sowie ausgelaugte, mechanisch geschwächte Partien entstehen können. Derartige Umlagerungen führen aber - besonders nahe den Grenzflächen zum anderen Medium - zwangsläufig zur Entstehung von Lagen unterschiedlichen Verhaltens, wie sie u.a. schon in den 30er Jahren beim Nachweis der sogenannten sandig-mehliges Zwischenschicht bei Verwitterungsprofilen von *Kiesling* ([48], S. 6) beschrieben worden sind. Hierbei ist makroskopisch ein Erscheinungsbild zu erkennen, das unter gleichen Bedingungen an anderer Stelle vielleicht weit weniger ausgeprägt und wohl eher einem Zwischenzustand zuzuordnen wäre. Beobachtungen dieser Art finden allerdings

erst dann Eingang in die einschlägige Literatur, wenn Substanz oder Ästhetik eines Gebäudes bereits infragegestellt worden sind (vgl. [55]). Dies mag an die Annahme von *Künzle* [51] erinnern, der dem Sichtbarwerden von Schäden eine sogenannte Resistenzphase (Zeitdauer der latenten Schädigung) voranstellt, die u.U. Jahrzehnte dauern kann.

Was die Verteilung von Sulfat in kalkhaltigen Baustoffen anbelangt, so können von *Félix* an der Molasse aus dem Raume Lausanne erhaltene Ergebnisse [21] einige Einsichten vermitteln. An den vor direkter Beregnung geschützten Stellen - durch bauliche Eigenheiten hervorgerufen und besonders an der Nordseite der Gebäude auftretend - zeigt das Calciumsulfat eine erhebliche Anreicherung in den äußeren Millimetern des Profils, was letztlich zum Abblättern der so entstandenen Partien führt. Dabei soll die Kalkkomponente der u.a. von Rußpartikeln durchsetzten eigentlichen Kruste allerdings nur teilweise aus dem Originalgestein stammen. Demgegenüber erfährt das Material an den stark durch Beregnung bzw. mit Ablaufwasser beaufschlagten Gebäudeseiten nur eine verhältnismäßig geringfügige Anreicherung in der Außenzone, aber dafür in etwa 5 bis 20 mm Tiefe. In dieser ist beim vorgenannten Verwitterungstyp bereits der "Normalgehalt" erreicht worden, eine erhöhte Konzentration mit mikroskopisch nachweisbaren Rissen, von denen der Autor vorsichtig schreibt, sie seien nicht mit Sicherheit als Folge einer Schädigung zu deuten. Ebenso stehen klare Aussagen darüber aus, inwieweit der häufiger auftretende, mit CO₂ beladene Niederschlag durch Wanderung innerhalb des Porensystems neben der des Sulfats auch die Verteilung des besonders SO₂-anfälligen hochdispersen Kalkanteils über das gesamte Profil hin beeinflusst haben mag. Man kann dieser vielschichtigen Phänomenologie jedenfalls nicht aus dem Wege gehen, zumal hier Gesetzmäßigkeiten an praktisch ein und derselben Gesteinsart studiert werden. So sind wenigstens Ähnlichkeiten mit dem Gefüge der Putzmörtel anzunehmen, weshalb sich die für die Entstehung von solchen Profilen bestimmenden Faktoren also auch weitgehend übertragen lassen müßten. Dann aber gewinnen die Größe sowie das Verhältnis der dem atmosphärischen Kontakt ausgesetzten Flächen des Mörtelkörpers zu den "geschützten" Äquivalenten an Bedeutung.

Bei Mauermörtel handelt es sich um den die Ziegel umgebenden Baustoff mit kopf- bzw. läuferflächenparalleler Oberfläche, soweit nicht fugenparallele Risse oder Ablösungen vom Baustein auftreten. Putzmörtel stellt demgegenüber eine einseitig exponierte, überwiegend senkrecht angeordnete Scheibe eines zyklisch erhärtenden Zuschlag-Bindemittel-Gemischs dar. Abhängig von Rauheit und Rissen unterliegt er einem mehr oder weniger gleichmäßigen Carbonatisierungsfortschritt, der sich freilich bei längerer Standzeit meist verwischt. Denn da die entsprechende Reaktionsfront praktisch stets mit der kapillaren Feuchtigkeitbewegung einhergeht, ist sie ja in allen Raumrichtungen wirksam. Hierfür kommen als natürliche Lieferanten gleichermaßen Tauwasser wie Regen in Betracht, wobei alle Stadien zwischen einer vollständigen

Sättigung und dem isolierten Porenwasserfilm eine Rolle spielen dürften. Maßgeblich ist folglich neben dem lokalen CO_2 -Angebot der jeweils vorhandene Feuchtigkeitsgehalt, der übrigens auch von einer Mittlerfunktion der angrenzenden Baustoffe abhängt, also mit deren Aufnahme-, Speicher- und Abgabefähigkeit, aber auch mit der Nachbarschaft zu Anschlüssen wie etwa Sockeln. Der Abstand von der jeweiligen freien Grenzfläche zur Umgebung sowie Häufigkeit und Dauer einer rhythmischen Befeuchtung bestimmen zusätzlich den weiteren Verlauf der Umwandlung in Carbonat. Vom analytischen Standpunkt dürfte daher die Ermittlung eines pauschalen CO_2 -Gehalts wenig hilfreich sein, was für das zu einem späteren Zeitpunkt durch Reaktion entstandene Sulfat gleichermaßen gilt. Zur Kennzeichnung der Verhältnisse sollte man deshalb eher Art und örtliche Anreicherung der Salze heranziehen.

Bei der Porenraumgestaltung ist im Hinblick auf die Kornpackung des Zuschlags der Kalkhydratanteil und dessen Aufschlußgrad sowie der Anmachwassergehalt, die Verdichtung und die Bindungsgeometrie von entscheidender Bedeutung. Entmischung, Sedimentation und Feuchtigkeitstransport in der Frühphase dürften hierzu ebenfalls einen Beitrag liefern, zumal die Früherhärtung grundsätzlich auf der Annäherung der einzelnen anlagerungsfähigen Bindemittelteilchen beruht. Dafür stellt im Falle eines Luftkalkmörtels der Feuchtigkeitssenzug aus dem mit Wasser angemachten Gemisch die wesentliche Bedingung dar, um zusammen mit dem Zuschlaggerüst einen verdichteten Körper entstehen zu lassen (R o d t [81]). Eine derartige Definition läßt aber ahnen, daß man diese Mischung gegenüber dem nahezu inerten Material der Ziegel, das sie zu einem Mauerwerk verbinden oder als Putzschicht überdecken soll, aufgrund der betreffenden Vorgänge weniger leicht beurteilen kann.

Daß die Arbeitsvorgänge im Zuge des mehrlagigen Aufbringens von Mörteln, ebenso wie die Intensität des Nachbearbeitens von Putzoberflächen durch Glätten oder Kratzen von Einfluß auf deren Textur und Durchlässigkeit ist, braucht nicht besonders erwähnt zu werden. Die Entstehung von schichtförmigen Inhomogenitätsbereichen - wie wirksam diese auch immer sein mögen - ist vor Jahren diskutiert worden [62]. Das von gewissen Baufirmen, mitunter auch von Denkmalpflegern geäußerte Ansinnen, bereits am Bauwerk vorhandenen Putz mit Konservierungsmitteln zu behandeln, kann übrigens in gleicher Weise zu einer solchen Schichtenbildung beitragen. Ob es sich also im einzelnen um das Zwischen- oder Endstadium einer natürlich oder durch Konservierung künstlich hervorgerufenen Inhomogenität handelt, macht keinen grundsätzlichen Unterschied im Hinblick auf den aktuell vorliegenden Zustand, wenngleich deren Art u. U. erst indirekt anhand von Verformungseigenschaften, thermischen oder hygrischen Merkmalen festzustellen ist (vgl. ebenso K ü n z e l [52]).

Wesentlich für die Einschätzung des Carbonatisierungsgrads, dem bei der Probenahme von Mörteln eine besondere Bedeutung zukommt, ist natürlich deren Alter.

Allerdings läßt sich die Datierung häufig nicht genau genug durchführen. Denn dem Zeugnis von Hausbesitzern oder Mietern zu trauen oder aber Hinweise darüber in Bauunterlagen zu finden, ist und bleibt nach wie vor Glückssache. Über vergleichbare Schwierigkeiten anläßlich einer Dokumentation von Natursteinkomponenten an Bauwerken im Münchener Stadtzentrum berichten übrigens G r i m m und S c h w a r z [26], in deren Programm eine ähnliche Beurteilung der Expositionsdauer gegenüber atmosphärischen Einflüssen vorgesehen gewesen ist. Die Kenntnis davon wäre aber umso wichtiger, da man zu berücksichtigen hat, daß der Untergrund, besonders beim Vorhandensein von Mörtelfugen, sich unter Feuchtigkeitseinwirkung als Speichermedium für physikalisch und chemisch bedingte Stoffwanderungsprozesse erweist. Beinahe bedrückend ist im Falle von Putzmörteln auch die Unkenntnis über dessen Gefüge, vor allem in bezug auf die bauphysikalischen Gegebenheiten: So liegen praktisch keinerlei Erfahrungen darüber vor, wie sich etwa ein Außendeckenputz an Balkonen während des Auftrags und danach im Vergleich zu seinem Äquivalent in der aufgehenden Wandfläche anders entwickelt. Möglicherweise werden aber unter dem Einfluß der Eigenlast trotz gleicher Zusammensetzung, Konsistenz und Homogenität im Hinblick auf die Festmörteleigenschaften lokale, vielleicht kaum wahrnehmbare Unterschiede angelegt, die später für das mechanische, thermische oder hygrische Verhalten bedeutsam sein können.

Schließlich kommen für ein Mörtel/Baustein-System aber noch folgende Argumente erschwerend hinzu: So lassen sich die wesentlichen Eigenschaften von Frisch- und Festmörtel quantitativ kaum zufriedenstellend erfassen, und auch die Wechselbeziehungen innerhalb von Mörtel/Substrat-Paaren beliebiger Art bleiben weiterhin unklar, so daß die Wirkung des Putzgrunds auf den Mörtel ebenso wenig zuverlässig eingeschätzt werden kann. Das heißt, daß man es mit Unwägbarkeiten zu tun hat, die nicht nur allein von der Existenz der beiden Bestandteile des Verbunds herrühren, sondern auch von deren gegenseitiger Beeinflussung, die ein solches System dann auf einer höheren Ebene komplizieren. Stellvertretend könnte man dieses Dilemma vielleicht anhand des kapillaren Feuchtigkeitstransports deutlich machen, bei dem neben Wasserrückhaltevermögen und Verdunstungsverhalten Porenvolumen und -größenverteilung für die Bindungsverhältnisse an der Grenzfläche beider Medien verantwortlich sind. Wieviel Unsicherheiten hat man da noch beiseite räumen müssen, um wenigstens Teilaspekte der Vorgänge begreifen und versuchstechnisch fassen zu können! Dabei ist noch nichts über die Art des Anwurfs gesagt, geschweige denn über eine Platzierung an Gebäudeecken und Anschlüssen, was aber für die Frage nach der Wirkung von mechanischen Widerlagern interessant wäre. Den solchermaßen vorgeprägten Frischmörtel beeinflussen die Verfestigungsvorgänge beim Abbinden und bei der Carbonatisierung, und zwar Hand in Hand mit einem örtlich bedingten Wechsel von Befeuchtung und Trocknung, wobei sich gleichzeitig die entstehenden Calcitkristalle vergrößern (vgl. N e y [60]). In der Phase der Späterhärtung, d.h. nach dem erstmaligen Abtrocknen

des aufgetragenen Frischmörtels, wird der Feuchtigkeits-transport nicht nur durch Diffusion allein gesteuert, sondern - entsprechend den bauphysikalischen Gegebenheiten - auch durch Kapillarleitung von flüssigem Wasser, das mit Kohlenstoffdioxid beladen den "Kalkkreislauf" in Gang bringt. Dies dürfte der Hauptfaktor für jenes zyklische Umkristallisieren des Carbonats auf Kosten der kleineren Teilchen sein. Daß in deren Gefolge - abgesehen von einer unvermeidlichen Schwächung der Struktur - so durch Verringerung der reaktiven Oberfläche eigentlich eine widerstandsfähigere, weil weniger angreifbare Bindemittelmatrix entsteht, läßt sich letztlich als Vorteil eines Altmörtels anführen. Nicht vergessen darf man, daß nahezu gleichzeitig die Reaktion mit SO_2 einsetzt.

Bei Diskussionen über Kalkmörtel wird häufig übersehen, daß es sich dabei nicht um ein einfaches binäres System von Zuschlag und Bindemittel handelt. Vielmehr ist daneben der Porenraum vorhanden, der - intra- oder intergranular - eben nicht nur einen Luft enthaltenden Hohlraum darstellt, sondern u.a. eine Art Magerungseffekt hervorruft und darüber hinaus als Speicher- und vor allem Transportraum für Feuchtigkeit bzw. Lösungen dient. Aber selbst dieses komplexe Haufwerk aus Zuschlag und einem Gemisch von Bindemittel, Wasser und Luft, das der Konfiguration Zuschlaggerüst/langzeiterhärtendes Bindemittel/Porenraum zustrebt, läßt sich mit quantifizierenden naturwissenschaftlichen Methoden bislang nur unvollkommen erfassen. Das gilt nicht nur für die durch Bindemittelherstellung und Mörtelbereitung vorgegebenen Unterschiede, sondern auch für die räumliche Anordnung der Einzelbestandteile im Endprodukt, das gemäß seiner Exposition ja auch nachträglich atmosphärischen Einflüssen unterliegt. Bei historischem Material kommt zudem in der Regel noch eine mehr oder weniger stark entwickelte hydraulische Komponente hinzu, stamme sie nun aus dem Rohstoff des Bindemittels selbst, aus der Aktivierung an der Grenzfläche zum Zuschlagkorn infolge eines in alten Zeiten geübten gemeinsamen Lösprozesses, oder wäre sie absichtsvoll mit Hilfe puzzolanhaltiger Zusätze wie Ziegelsplitt oder -mehl eingebracht worden, um letztlich die mechanischen Eigenschaften des Mörtels zu verbessern. So werden dann die Verhältnisse schon wieder unübersichtlich, weshalb es kaum verwunderlich erscheint, wenn eine zusammensetzungs- bzw. herstellungsspezifische oder gar örtliche resp. chronologische Zuordnung an fast unüberwindliche Grenzen stoßen. Die meisten Probleme dürften darin bestehen, das sich zwangsläufig öffnende Spektrum aller möglichen Merkmale zu überblicken und verbindlich über deren jeweilige Signifikanz zu befinden (J e d r z e j e w s k a [45]). So spielen Ausgleichsvorgänge von Pore zu Pore - auch auf dem Wege über die Dampfphase - und Wanderung leichtlöslicher Salze in Richtung des Konzentrations- und Feuchtigkeitsgefälles eine Rolle. Lokal unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte können partiell auch zu zeitweiligen Festigkeitsverlusten im Kornbindemittel führen. Dies ist im Zusammenhang mit den ebenfalls ortsabhängigen thermisch bedingten Volumenveränderungen bedeutsam. Denn eine geringfügige Modifikation des Zuschlaggemischs bewirkt nicht

nur die Veränderung der Kornpackung, sondern auch die des Anmachwasserbedarfs für die Mörtelherstellung, was nach dem Verdunsten des Restwassers letztlich in einem andersartigen Porengefüge zum Ausdruck kommt. Solche Komplikationen lassen jedoch erkennen, daß ein irgendwie gearteter Austausch eines Teils der Mischung - sei es durch einen Feststoff mit vorgegebenem Korngrößenaufbau oder einen Flüssigkeitszusatz innerhalb eines bestimmten Volumens - die Bindungsgeometrie der Einzelbestandteile so verändert, daß z.B. die Zweckmäßigkeit des Vergleichs mit einem Material "ohne Zusatz" fraglich wird, weil dabei einfach der Bezugspunkt aus dem Blickfeld gerät. Eine Veränderung jenes Gerüsts wird nämlich nicht nur von der auf das einzelne Gefügekorn bezogenen Anzahl seiner nächsten Nachbarn und den dadurch vorgegebenen Kontaktstellen sondern auch von der Raumerfüllung durch das Kornhaufwerk geprägt.

Bleibt man in der Analogie von Kalkmörtel und Sandstein mit calcitischem Bindemittel, so sind eklatante Unterschiede festzustellen. Während sich der letztere im natürlichen Sediment über geologische Zeiträume hin aufgrund von wechselnden Bedingungen von Auflösung und Wiederausscheidung verdichtete oder verfestigte und im Zuge der Diagenese sein Gesamtvolumen verkleinerte, hatte der Mörtel dazu weniger Gelegenheit. Die zwangsläufige Folge war eine meist nur punktuelle Berührung zwischen Bindemittel und Zuschlag. Noch schwieriger erwies es sich, überhaupt einen vollflächigen Kontakt zwischen einem Mörtel und einem Ziegel im mikroskopischen Schliffbild sichtbar zu machen [63], [70] (vgl. auch *Bild 8*). Solcherart lückenhafte Bindung der Komponenten verringert zwar die pauschale Festigkeit, unterstützt aber andererseits die Flexibilität des Materials bei Volumenveränderungen. Erst nach periodischer Befeuchtung und Austrocknung, wie sie in der Mörtelscheibe über längere Zeiträume auftreten, kann also eine vergleichbare Verfestigung erfolgen.

Frühere Interpretationen, die den Verwitterungsvorgang ausschließlich mit chemischer An- oder Auflösung der Kornbindung in Zusammenhang bringen, treffen auf den vorgefundenen Sachverhalt nur ansatzweise zu. Weit eher ernstzunehmen sind hierfür unterschiedliches thermisches Ausdehnungsverhalten der einzelnen Bestandteile des Mörtels, der Einfluß von Temperaturgefälle sowie die Schädigung infolge Volumenvergrößerung durch kombinierte Einwirkung von Feuchtigkeit und Frost oder hydratisierende bzw. kristallisierende Salze. Auch hier ist eine klare Grenzziehung kaum möglich, womit dem Verlangen nach einer sauberen Definition des Begriffs "Verwitterung von mineralischen Baustoffen" wieder ein Hindernis mehr in den Weg gelegt werden würde. Jedenfalls hat es den Eindruck, als wenn das Phänomen "Schichtenbildung" stets mit einem Verlust und/oder herstellungsbedingten Mangel an Homogenität verbunden wäre.

Was die jeweils erreichbare und auf Dauer aufrechtzuerhaltende Festigkeit anbetrifft, so sind bisher nur wenige Aspekte überhaupt bekannt. Das randlich durch einen weiteren festen Baustoff begrenzte bzw. eingezwängte

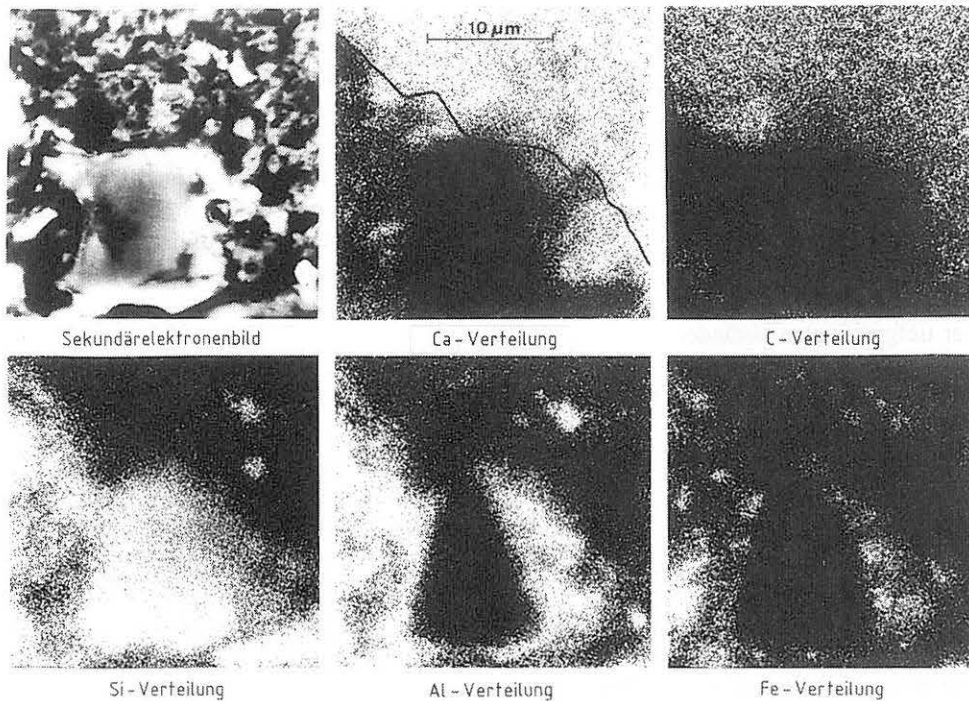


Bild 8: Im Elektronenstrahl-Mikroanalysator kommt die Grenze zwischen Mauerziegel und Kalkmörtel aufgrund der Elementverteilungen deutlich zum Ausdruck.

System des Mörtels ist nämlich in bezug auf Entstehung und Standdauer mehreren einander überlappenden, ja mitunter gegenläufigen Prozessen unterworfen. So wird - um nur einige davon zu nennen - der Zusammenhalt und damit auch das Langzeitverhalten nicht nur durch die Kristallvergrößerung des Calcits beeinflusst, sondern schon im Frühstadium der Erhärtung durch den Magerungseffekt, der im Falle der beim Naßlösen von Kalk gut aufgeschlossenen Hydratteilchen in Wechselwirkung mit den umschlossenen Zuschlagkörnern und den Primärporen eine Rolle spielt (vgl. [69]). Ein vergleichbarer Mechanismus, wie er in dem ursprünglich ionendispersen Nebeneinander der Ca- und Mg-Anteile eines Dolomitmalks begründet liegt [71], dürfte ebenso für die Festigkeitsentwicklung von Bedeutung sein. Weitere Faktoren sind Binde-mittelauslaugung oder Versprödung im Zuge von Zementationsvorgängen einzelner Komponenten, was Unterschiede in deren hygri-sch und thermisch bedingter Ausdehnung sowie schließlich Risse meist nahe den Korngrenzen hervorruft.

Zur schon erwähnten Schichtenbildung trägt zweifellos die Anwesenheit von Mikroorganismen bei. Deren Wirkung beruht jedoch nicht allein auf der Verstopfung von Transportwegen für Feuchtigkeit, sondern vor allem auf dem hygroskopisch aktiven Verhalten der schleimigen Biomasse, deren Art und Menge ganz wesentlich auch vom pH-Wert im Baustoff und dem aktuellen Mikroklima abhängt und so die Materialfeuchtigkeit erhöht. Läßt man einmal den weniger häufigen Fall einer oberflächennahen Schädigung, etwa durch Bearbeitung mit stumpfem Werkzeug, außer acht, so sind Sedimentgesteine - abgesehen von ihrer Schichtung - allgemein als einigermaßen homogen im Hinblick auf die physikalisch-technischen Eigenschaften anzusehen, weshalb also ein solches Phänomen erst nach längerer Standzeit etwa im

Zuge alternierender Feuchtigkeitsbewegung oder SO_2 -Angriff eintritt. Nicht so der Putzmörtel, der bereits während des Anwerfens und Glattziehens eine ausgeprägte Textur parallel zur Außenfläche entwickelt hat, so daß sich infolge deren Überlagerung mit den Ergebnissen von Erhärtung und Verwitterung bei der jeweiligen Zuordnung zwangsläufig Unklarheiten ergeben. Mit anderen Worten: Es dürfte sich kaum klären lassen, inwieweit ein beispielsweise durch Verschleiß ermitteltes Festigkeitsprofil mit der einen oder anderen Entstehungsmöglichkeit ursächlich im Zusammenhang steht. Denn Auslöser hierfür sind letzten Endes sich überlappende Fronten der verschiedenartigen Wirkungsmechanismen mit Unterschieden in Fortpflanzungsgeschwindigkeit und zeitlicher Abfolge. Unter diesen schwer kontrollierbaren Ausgangsbedingungen kann es bereits während der Frühphase des Abbindens und ehe die Carbonatisierung überhaupt richtig eingesetzt hat, zur Reaktion mit der schwefeloxidhaltigen Atmosphäre kommen. Dabei sollte kein Zweifel darüber aufkommen, daß für die bei einer Exposition als Reaktionspartner in Betracht zu ziehende Kalkkomponente nicht allein die mittlere Konzentration in der Luft, sondern vielmehr die Immissionsrate von Bedeutung ist, die man nach L u c k a t [53] als "die von der Flächeneinheit in der Zeiteinheit aufgenommene Schadstoffmenge" zu definieren hat. Auch hieraus geht hervor, wie vielschichtig und damit kaum überschaubar das Geschehen ist, und was bei versuchstechnischen Überlegungen alles berücksichtigt werden mußte.

Weder eine Anreicherung noch eine irgendwie geartete Verteilung der aus iso- oder allochemischer Umsetzung stammenden Reaktionsprodukte führt zwangsläufig zur Schwächung des Materialgefüges. Durch Kristallwachstum z. B. von $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ wird das Porensystem verengt, so daß es mittelbar zu Schäden im Zuge einer

Entstehung von Feuchtigkeitsfallen kommt (vgl. [60]). In welchem Habitus - von Krusten aus parallelstrahligen Aggregaten bis zu whiskerartigen Einzelindividuen - Gipskristalle zur Ausscheidung gelangen und den Porenraum auffüllen, hängt dabei offensichtlich vom Lösungsnachschub bzw. den lokalen Feuchtigkeitsverhältnissen ab, was auch die von Z e h n d e r und A r n o l d [96] durchgeführten Versuche mit Natriumnitrat nahelegen. Mithin braucht sich der örtliche Chemismus nicht merklich zu wandeln, während gleichzeitig die physikalisch-technischen Eigenschaften einer tiefgreifenden Veränderung unterliegen. Solche Befunde können nicht mehr als Andeutungen dafür liefern, mit welchen Schwierigkeiten man bei der quantitativen Beurteilung des Vorher und Nachher während des Expositionsgeschehens zu rechnen hat. Diese Erfahrungen mindern letztlich auch die Aussagekraft von Tiefenprofilen, wie sie von EDX-Analysen im Rasterelektronenmikroskop her bekannt sind. Um einen aktuell vorliegenden Zustand hinreichend zu beschreiben, ist weit eher die profilmäßige Erfassung eines Parameters der mechanischen Festigkeit (vgl. [43]) oder aber die eines Porenmerkmals anzustreben. Die Schichtenbildung selbst hat man also nicht nur als Begleiterscheinung sondern als eine von den Hauptursachen der Verwitterung anzusehen. Im Verlauf der langjährigen Exposition eines Baustoffs im Freien ist sie damit zugleich Motor und Ziel der Beanspruchungen und findet in der Veränderung von Gefüge und Chemismus ihren Ausdruck. So werden nach und nach innerhalb des Materials bzw. in dessen offenem Porenraum neue geometrische Verhältnisse geschaffen, die schließlich auch ein verändertes Eindringen und Durchströmen der Fluide verursachen.

Immer wieder ist zu beobachten, daß sich beim Feuchtigkeitstransport lösliche Salze in der Nähe der Verdunstungsfront, an der Baustoffoberfläche oder unmittelbar darunter ausscheiden. Dies gilt bei Mörtel sowohl für chemische Verbindungen, die durch Reaktion einer Komponente mit Agenzien aus der Atmosphäre entstehen, aber auch für solche, die das Material von vornherein enthält, wie z.B. Calciumhydroxid. Als Wetterschutz eines Gebäudes ist dieses damit sowohl Angriffen chemischer wie auch physikalischer Art ausgesetzt. Die aggressiven, d.h. vor allem mit der Bindemittelphase reagierenden Medien üben ihre Wirkung nicht gleichmäßig über das gesamte Materialvolumen aus. Die örtliche Geometrie des Putzmörtels sowie die Möglichkeit der Taubildung oder die Dispersität und Bedeckung der Kristalloberflächen mit Reaktionsprodukten, die schließlich einen Gradienten hervorrufen, beeinflussen das jeweilige Verhalten erheblich. Grundlage dafür ist neben der Gaspermeabilität auch der Kapillaraufstieg, welcher direkt mit der Porengrößenverteilung zusammenhängt. Hierdurch kann ebenso eine Heterogenität senkrecht zur Oberfläche erzeugt werden, die die Texturen infolge von Herstellung und Carbonatisierung noch zusätzlich überlagern. Diese räumlich und zeitlich unterschiedlichen Vorgänge, die zum Entstehen eines Tiefenprofils beitragen, nachträglich zu rekonstruieren, scheint somit nahezu aussichtslos. Denn für sich gesehen ist jeder davon gleichsam Aus-

gangspunkt für den folgenden. Um hier einen Überblick zu gewinnen, bedarf es einer geeigneten Aufschlußmethode, wie sie etwa der wäßrige Auszug darstellt. Mit seiner Hilfe lassen sich die interessierenden wasserlöslichen Verbindungen analysieren, ohne dabei eine ungewünschte Auflösung weniger charakteristischer Bestandteile zu begünstigen. Wegen der starken Streuung kommt bei diesen Untersuchungen den Einzelbefunden eine nicht so große Bedeutung zu, während Tendenzen in jedem Falle nähere Beachtung verdienen.

Das zentrale Problem der Schädigung besteht aber in der Art und Intensität der hierbei wirksamen Vorgänge. Während ein kalkhaltiger Sandstein mit gering entwickeltem Porenraum gefügespezifisch durch die unterschiedliche Tiefenlage der erwähnten "sandig-mehliges Zwischenschicht" reagieren wird, sind derartige Bildungen in Putzmörtelprofilen eigentlich nur dann zu erwarten, wenn eine dichtende, im wesentlichen aus Salzen und Rußauflagerungen bestehende Kruste die Bedingung hierfür schafft. Dies gelingt kaum, wenn die Poren, die dann verstopft werden müssen, zu groß sind. In einem solchen Fall ist jedoch damit zu rechnen, daß aufgrund eines eher geringen mechanischen Zusammenhalts die Feststoffstege in einer etwa entstandenen Schwächezone zu Bruch gehen und die oberflächenparallele Schicht nach Art einer Schale abgedrückt wird, so daß dieser Prozeß binnen kurzem wieder von vorn beginnen kann. Da ein entsprechendes Verhalten vor allem durch hohe Reaktivität des Bindemittels (z.B. Dolomitkalk) und starke Rußimmission gefördert wird, ist es daher außerhalb des Zusammenspiels derartiger Faktoren praktisch kaum anzutreffen.

Natürlich hat man sich darüber im klaren zu sein, daß die meisten Schädigungen des Materials auf unterschiedlichen Ursachen beruhen, was bedeutsam ist, wenn eine selektive Aussage über die schädigenden Hauptfaktoren gewünscht wird. Das kann dazu führen, daß sich anscheinend sekundäre Einflüsse unversehens als Hauptursachen entpuppen. Obwohl die bei der Untersuchung derartiger Materialien auftretenden Probleme bereits vor mehr als einem Jahrzehnt beschrieben worden sind (z.B. [61]), werden sie vielerorts einfach nicht zur Kenntnis genommen. Auch ist es häufig auf Unverständnis gestoßen, daß die jeweils aktuelle quantitative chemische bzw. mineralische Zusammensetzung eines Materials zwar die Grundlage für den SO_2 -Angriff schafft, die Dispersität der reaktiven Phasen und das Porengefüge aber eigentlich die empfindlichen Punkte bei jener physikalischen Beanspruchung darstellen. Diese Umstände zu analysieren, ist u.a. Aufgabe dieses Forschungsprogramms gewesen. Im Vordergrund der Bemühungen stehen so naturgemäß die Charakterisierung bauphysikalischer Daten einschließlich deren Veränderungen und die der Elementkonzentrationen in Tiefenprofilen.

4 Kennzeichnung des Materials und seiner Veränderungen

Über die Technologie von Kalkmörteln - gestützt auf begleitende Versuche mit naturwissenschaftlichem Anspruch - ist überwiegend im vorigen Jahrhundert bis zu Beginn des 1. Weltkriegs nachgedacht worden. Von Ausnahmen abgesehen, rückt das Thema erst in der Wiederaufbauphase nach dem 2. Weltkrieg erneut in das Blickfeld, während schließlich bei zunehmender Mechanisierung der Herstellung von Mörteln und der damit verbundenen Standardisierung eine Verdrängung zugunsten von mehr zementhaltigen Bindemitteln erfolgte. Allerdings ist die Versuchspalette zur Kennzeichnung von Frischmörteln und deren Endprodukten vor einer Exposition in Hinblick auf Gefügemerkmale bis auf den heutigen Tag nicht sonderlich entwickelt. Dazu mag auch die Tatsache beigetragen haben, daß hydraulische Anteile einer kontinuierlichen Veränderung unter Neubildung von Calciumhydroxid unterliegen, was natürlich auch Rückwirkungen auf das Gefüge hat. Ebenso bereitet die geringe Dicke einer Mörtellage im Vergleich zu ihrer Erstreckung Schwierigkeiten, zumal sich wegen des schichtartigen Vordringens der Carbonatisierungsreaktion ein Probekörper von annehmbarer Größe mit gleichbleibenden Merkmalen nur bedingt gewinnen läßt. Diesem Umstand ließe sich durch Verwendung z.B. eines Kalksteins mit hoher Porosität und geringer Einzelkristallgröße abhelfen. Der wiederum würde jedoch merklich weniger Neigung zur Reaktion mit schwefeloxidischen Luftverunreinigungen zeigen, was von Nachteil gegenüber dem mit einer Kalkkomponente von hoher Dispersität ausgestatteten Putzmörtel wäre, welcher aber längere Zeit zu seiner Erhärtung braucht. Abweichend von den baupraktischen Bedingungen kann man jedoch bei einer Mörtellagerung im Labor - insbesondere bei hoher Luftfeuchte - eine gleichmäßige, nahezu allseitige CO_2 -Reaktion erzielen.

Bei der profilmäßigen Kennzeichnung nach unterschiedlicher Expositionszeit erweist sich die geringe Anzahl von Verfahren, die für derartige Untersuchungen geeignet wären, als Hindernis. Denn immer wieder ist es die mangelnde Homogenität senkrecht zur Grenzfläche des Materials mit der Atmosphäre, die zu merklichen Einschränkungen des versuchstechnischen Instrumentariums Anlaß gibt oder nur untypische Mischwerte für ein charakteristisches Merkmal zu erhalten gestattet. Hierunter leidet noch am wenigsten die Erfassung seines Chemismus. Neben der schon erwähnten Dünnschichtigkeit, die einer Untersuchung von homogenem Material bei vorgeschriebener Probengröße im Wege steht, erschwert bei Putzmörteln die mit einem geringen Zusammenhalt der Einzelkomponenten verbundene Bröckeligkeit deren experimentelle Handhabung. So unterliegt die überwiegend durch punktuelle Kontakte ausgezeichnete Kornbindung leicht einer Beeinträchtigung - sei es durch Lösungsvor-

gänge oder mechanische Beanspruchung infolge unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhaltens von Zuschlag und Bindemittel, oder sei es bei Anwesenheit von Feuchtigkeit.

Im Bestreben, die Verwitterungsergebnisse an den betreffenden Putzmörteln aufzuklären, hat man zunächst solche Merkmale herausfinden müssen, die sich im Zuge der Materialbeanspruchung überhaupt nachweisbar beeinflussen lassen und möglichst auch noch sicher meßbar sind. Entsprechende Veränderungen können sowohl phänomenologischer als auch struktureller Natur sein, sind jedoch versuchstechnisch in der Regel nur mittelbar zugänglich. Keinesfalls ist klar, ob die verfügbaren analytischen Methoden zu erfolversprechenden Aussagen führen. Schwierigkeiten entstehen zusätzlich wegen der langen Lagerzeiten, nach denen dies eigentlich erst möglich wird. Zwar findet man immer wieder durch chemische Reaktionen hervorgerufene, mikroskopisch sichtbare Mineralneubildungen, die aber nicht zwangsläufig in gefügebezogenen Parametern ihren Niederschlag finden: Sofern beispielsweise eine Blockade des Porensystems durch SO_2 -bedingte Krustenbildung zu erwarten ist, kann ein entsprechender Effekt kaum beobachtet werden, wenn sich das Verhältnis der Porendurchmesser vor und nach Ablagerung der Reaktionsprodukte nicht wesentlich verändert hat. Anhaltspunkte dafür, daß solche Verschiebungen von Porengrößenklassen im Zusammenhang mit Alterungsprozessen bei Mörteln auftreten können, liefert beispielsweise eine Arbeit von Meucci und Rossi-Doria [58]. Unter diesem Blickwinkel scheint es zweckmäßig, zunächst Anreicherung resp. Verarmung charakteristischer chemischer Bestandteile über eine bestimmte Strecke von der Oberfläche in das Materialinnere hinein zu verfolgen.

4.1 Probenahme und Präparation

Um entsprechende Tiefenprofile zu erhalten, bedarf es eines millimeterweisen Abtrags von Probematerial, was hier von einem Fräser bewerkstelligt wird. Die Vorbedingungen dafür liefert eine steife Bohrvorrichtung, deren Fräserkopf praktisch keine Möglichkeit hat seitlich auszuweichen, wenn seine Schneidkanten die Zuschlagkörner des spröden Baustoffs treffen. Zuvor sollte die Mörteloberfläche in eine zur Schneideebene parallele Stellung gebracht werden. Derart läßt sich meist aber nicht die gesamte Probenoberfläche auf demselben Niveau überstreichen, so daß man für die erste Schicht gewissermaßen nur Inseln der vorstehenden Partien erfaßt und bei der ganzen Prozedur selektiv verfahren muß. Während des Programmablaufs stellte sich heraus, daß das gewonnene Probematerial aufgrund seiner Beschaffenheit häufig für die vorgesehenen Untersuchungen nur in begrenztem Umfang vorlag bzw. geeignet war. Andererseits erwies sich der Einsatz der in diesem Bericht beschriebenen Verfahren mitunter als äußerst aufwendig. Und zwar galt dies auch für die Arbeiten schon vor den Versuchsvorbereitungen, wie z.B. dem Trocknen, Zerkleinern, Sieben und Extrahieren des Materials für die chemische Analyse oder dem

Ausheizen im trockenen Stickstoffstrom zwecks Bestimmung der spezifischen Oberfläche. Besonders umständlich war die Präparation für die Versuche zum kapillaren Saugen und zur Wasserdampfdiffusion. So konnten die Mörtelplatten der 17 Jahre alten Proben nur durch vorsichtiges Klopfen mit einem Kunststoffhammer auf die Unterseite der Basisplatten abgelöst werden - übrigens eine zeitraubende Prozedur. Da die Putzplatten dünn und häufig auch noch recht brüchig waren, andererseits aber meistens fest am Spritzbewurf hafteten, gelang es oft nicht, sie unbeschädigt zu gewinnen. Mitunter konnte erst nach mehreren Versuchen ein brauchbares Exemplar erhalten werden. Wegen der verhältnismäßig hohen Festigkeit des Faserzements war es auch nicht möglich, die Basisplatten rückseitig in kleine Stücke zu zersägen und so vom Mörtel zu trennen. Dies ging eigentlich nur bei Mörteln, bei denen man eine weniger feste Variante von Faserzement als Putzgrund verwendet hatte. Die Platten oder Stücke mußten dann entsprechend den Erfordernissen formatiert werden. Auch dabei ergab sich wegen der notwendigerweise vorsichtigen Arbeitsweise (Bruchgefahr!) ein merklicher Zeitaufwand. Folgedessen hatte man sich, z.B. für die kapillaren Saugversuche, häufig mit dünnen Platten von geringer Höhe zu begnügen. Die gleichen Schwierigkeiten bestanden bei dem Bauwerksmaterial, das oft durch das Abstemmen von der Hauswand und den Transport aber auch schon als Folge der Verwitterung eine verminderte Festigkeit aufwies. Die unregelmäßige Oberfläche solcher Proben, z.B. herstellungsbedingt bei Kieselkratzputz, und deren ungleichmäßige Dicke beeinflusste gelegentlich die Zuverlässigkeit der Resultate der Quecksilber-Porosimetrie, des kapillaren Saugens und der Wasserdampfdiffusion. An dieser Stelle muß erwähnt werden, daß die für die Probenahme in Frage kommenden Fassaden, an denen beispielsweise der Putz erneuert wurde, in der Regel nur kurze Zeit zugänglich waren. Mitunter machte auch ein vorliegender Anstrich den Putz für Untersuchungen ungeeignet, so daß sich die Anzahl an geeigneten Proben oft erheblich verringerte.

Daher konnte praktisch nur labormäßig hergestelltes Material für den millimeterweisen Abtrag zur Gewinnung eines definierten Tiefenprofils ohne weitere Vorbereitung herangezogen und mit der notwendigen Präzision in die Fräseinrichtung eingespannt werden. Für Bauwerksproben war es wegen ihrer Brüchigkeit und unterschiedlichen Dicke dagegen erforderlich, sie in einem Holzrahmen unter Verwendung von Epoxidharz einzubetten. Nach dieser Methode ließ sich auch die Oberfläche verschiedener Putzfragmente auf gleichem Niveau fixieren.

4.2 Porenraumbezogene Eigenschaften und Merkmale

4.2.1 Über die Einsatzfähigkeit der Prüfverfahren

Eine Vielzahl von Schäden an Bauwerken ist mit Wassereinwirkung in Verbindung zu bringen. So hat die Beeinträchtigung mineralischer Baustoffe häufig ihre Ursache im Auflösen, Transportieren und Wiederausscheiden von oftmals hydratisierenden leichtlöslichen Salzen, und zwar im Porenraum und an der Materialoberfläche. Begünstigt wird das Ganze durch Schwankungen der Feuchtigkeit oder ist eine Folge des Gefrierens von deren überhöhtem Anteil im Mauerwerk. Das Ausmaß einer Durchfeuchtung hängt von der Aufnahme bzw. dem Füllungsgrad der Poren mit Wasser ab, so daß entsprechende Materialdaten zur Charakterisierung von porösen Baustoffen wesentlich beitragen. Der Porenraum - insbesondere sein offener, für den Feuchtigkeitstransport geeigneter Anteil - ist demnach ausschlaggebend für das Verwitterungsverhalten.

Eine regelrechte Krustenbildung läßt sich bei Mörteln und Putzmörteln nicht ausschließen, ist aber in den meisten Fällen wenig wahrscheinlich. So dürfte der größte Teil der einer Mörtelgruppe I nach DIN 18 550 [10] vergleichbar ausgeführten Bauwerksaußenschichten einen solchen Zustand kaum je erreichen. Schon das geforderte Festigkeitsgefälle in Richtung auf die Außenseite des Bauwerks verlangt für die Herstellung dieses Baustoffs ein eher "offenes" Gefüge. Einige Beispiele zeugen jedoch davon, daß es in Einzelfällen mit zunehmender Standdauer sehr wohl zu einer Verdichtung im Oberflächenbereich kommen kann. Daher scheinen Zweifel angebracht, ob sich der Einfluß auf die erfaßbare Durchlässigkeit stets prüftechnisch verfolgen läßt. Unter diesem Vorbehalt werden hier erst einmal alle den Porenraum indirekt beschreibenden Verfahren wiedergegeben, soweit sie für die vorliegende Aufgabe von praktischem Belang gewesen sind.

4.2.1.1 Porengrößenverteilung (Quecksilber-Porosimetrie)

Grundlage des Verfahrens

Es soll der Porenraum erfaßt werden, in dem Feuchtigkeit und Gase wandern können. Von besonderer Bedeutung sind dabei Porenvolumen und Porengrößenverteilung, die sich mit Hilfe der Quecksilberintrusion (Hg-Porosimetrie) ermitteln lassen. Das verwendete Gerät arbeitet nach einer von Ritter und Drake [80] sowie Purcell [75] vorgestellten Methode, bei der Quecksilber als nicht-benetzennde Flüssigkeit in die Poren des evakuierten Baustoffs gepreßt wird. Der Randwinkel von Quecksilber ist $> 90^\circ$, so daß es nicht in kleine Poren eindringt. Erst ein Injektionsdruck muß den entgegenwirkenden Kapillardruck überwinden, ehe der Hohlraum damit gefüllt wird. Unter der vereinfachenden Annahme, daß es sich um

zylindrische Poren handelt, wirkt der Druck p auf deren Querschnitt πr^2 . In entgegengesetzter Richtung resultiert aus der Oberflächenspannung die Kraft $-2\pi r \delta \cdot \cos \vartheta$. Im Gleichgewichtszustand sind beide Kräfte gleich groß. Daraus folgt:

$$\pi r^2 p = -2\pi r \delta \cos \vartheta.$$

Dabei sind:

- p = Injektionsdruck
- δ = Oberflächenspannung
- ϑ = Randwinkel
- r = Porenradius.

Hierin sind δ und ϑ weitgehend unveränderlich. Die Oberflächenspannung schwankt zwischen $484,2 \cdot 10^{-3}$ N/m bei 25°C und $472 \cdot 10^{-3}$ N/m bei 50°C . Im allgemeinen wird mit einem Wert von $480 \cdot 10^{-3}$ N/m gerechnet. Die Randwinkelunterschiede des Quecksilbers liegen zwischen 135° und 142° je nach Reinheitsgrad und Material. Für Silicate ist $141,3^\circ$ gemessen worden.

Wird die Formel nach r aufgelöst, so erhält man:

$$r = -\frac{2\delta \cdot \cos \vartheta}{p}.$$

Daraus geht hervor, daß mit steigendem Druck zunehmend engere Poren mit Quecksilber gefüllt werden. Die Methode ist in ihrer Genauigkeit durch folgende Umstände eingeschränkt:

- 1 Bei der Berechnung geht man von zylindrischen Poren aus, deren Idealgestalt jedoch keinesfalls typisch für ein Baustoffgefüge ist.
- 2 Durch das Hineinpressen des Quecksilbers in den Porenraum kann es örtlich zu Gefügezerstörungen kommen.
- 3 Als Hauptfehlerquelle ist der Beitrag der Flaschenhals-Poren (ink bottle pores) zum Meßergebnis anzusehen.
- 4 Enthält das Material hydratwasserhaltige Verbindungen, so können beim Trocknen bzw. Evakuieren Risse entstehen, die das Ergebnis ebenso verfälschen.

Anwendungsbereich

Zur Ermittlung der Porenvolumenverteilung wurde ein auf dieser Grundlage arbeitendes, serienmäßig hergestelltes Gerät eingesetzt. Damit kann man Drücke bis zu einem Maximum von 200 MPa für Porenradien zwischen ca. $7,5 \cdot 10^3$ nm und 3,75 nm erzielen. Die Apparatur verfügt über eine zusätzliche sogenannte Makroporeneinheit, die Porenradien zwischen $55 \cdot 10^3$ nm und $7,5 \cdot 10^3$ nm erfaßt. Die Volumenverteilung wird als Histogramm oder als Summenkurve dargestellt. Aus deren Verlauf lassen sich durch Zuordnung zu bestimmten Größenintervallen Daten zur Beurteilung des Frostverhaltens gewinnen. Die getrockneten, etwa 3 - 6 g schweren Proben einer Korngröße von 3 - 5 mm werden in ein Dilatometergefäß von

20 cm³ Inhalt eingebracht. Nach Evakuieren bis zu einem Druck von etwa 0,2 mbar füllt man das Gefäß mit Quecksilber und mißt die Höhe von dessen Spiegel. Dann wird belüftet, wobei Hg - abhängig vom jeweiligen Luftdruck - in die Poren eindringt. Das entsprechende Volumen errechnet sich aus der Veränderung des Hg-Meniskus, wodurch man den Makro-Porenanteil erhält. Danach wird das Versuchsgefäß in das eigentliche Porosimeter überführt und einem automatisch geregelten Druckanstieg unterworfen. Die Beziehung zwischen den registrierten Größen Porenvolumen V und Injektionsdruck p demonstriert Bild 9. Die Durchführung des Verfahrens und die Auswertung der Ergebnisse ist in DIN 66 133 [16] niedergelegt.

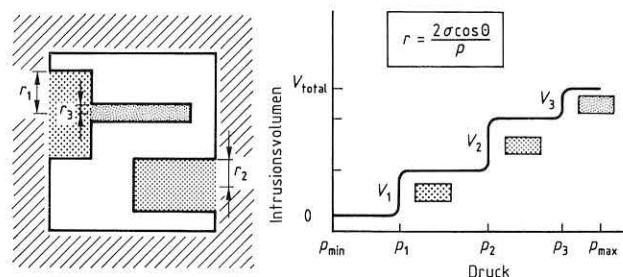


Bild 9: Schematische Darstellung der Quecksilberintrusion in Poren unterschiedlicher Größe (nach K. R ü b n e r, persönl. Mitt.)

Darstellung der Ergebnisse

Bereits von H i r s c h w a l d [33], der den Sättigungswert entdeckt hat, ist erkannt worden, daß zwischen Porengrößenverteilung und Frostbeanspruchung bzw. Schädigung durch Salzkristallisation eine enge Beziehung besteht. Unter diesem Gesichtspunkt werden mit Hilfe der aus Druck- und Volumenmessung erhaltenen Werte die Häufigkeitssummen des Porenvolumens in Abhängigkeit vom Logarithmus des Porenradius r dargestellt. Aus derartigen Kurven lassen sich nun bestimmte Intervalle herausgreifen. So haben H o n e y b o r n e und H a r r i s [44] die sogenannte Mikroporosität definiert, worunter der Anteil an offenen Poren $\leq 5 \mu\text{m}$ Durchmesser zu verstehen ist. Dies trägt der Tatsache Rechnung, daß in der Regel kleinere Poren weit eher am Zerstörungsmechanismus teilhaben als größere. Material, dessen Mikroporosität $> 30\%$ beträgt, soll nach Ansicht dieser Autoren nicht mehr beständig sein.

D' H a v é und M o t t e u [7] ziehen für keramische Produkte den mittleren kritischen Durchmesser d_{10m} heran. Dabei handelt es sich um den Porendurchmesser an der oberen 10 % -Fraktile des gesamten mit Hilfe des Hg-Porosimeterverfahrens erfaßbaren Porenvolumens. Wenn der entsprechende Wert $3 \mu\text{m}$ überschreitet, soll das Material frostbeständig sein. Allgemein legt man ihn aber bei $2 \mu\text{m}$ fest. Die Untergrenze ist dadurch gegeben, daß Wasser nicht in die feinen Poren eindringt, während die obere dadurch markiert wird, daß grobe Poren die Tendenz zeigen, sich nicht vollständig zu füllen. Zur Kennzeichnung von Putzmörteln der hier untersuchten Art - sofern er von der Keramik darauf übertragen werden kann - bringt er jedoch häufig nicht den erhoff-

ten Nutzen, weil er sich bei Kalkmörteln meist außerhalb des Erfassungsbereichs des Verfahrens befindet (vgl. [30]). R a v a g l i o l i und V e c c h i [76], [77] geben für keramische Erzeugnisse ein Intervall zwischen 0,25 µm und 1,4 µm Durchmesser an. Es wird als Anteil am Gesamtporenraum ausgedrückt und im folgenden auch als R-Intervall bezeichnet. Bei Porengrößen von ≤ 0,25 µm sollen keine, bei solchen ≥ 1,4 µm nur in strengen Klimaten Frostschäden auftreten. Beträgt der Anteil an Poren innerhalb des Intervalls mehr als 25 %, so sollen die Ziegel nicht mehr beständig sein. Auch der Median (Größe des Porenradius an der 50 %-Fraktile der Porenvolumenverteilungskurve) hat sich zur Gefügekennzeichnung als geeignet erwiesen.

4.2.1.2 Kapillare Wasseraufnahme

Grundlage des Verfahrens

Kapillarer Feuchtigkeitsaufstieg ist Charakteristikum eines jeden feinpörigen Materials, sofern eine Verbindung der Porenkanäle untereinander hierfür die Voraussetzung schafft. Die Dynamik des Flüssigkeitstransports wird im wesentlichen durch Oberflächenkräfte sowie die Porengrößenverteilung beeinflusst und beruht auf der Beziehung

$$y_s = a(1 - e^{-bt^{0.5}}) \quad [37].$$

Darin bedeutet y_s die zur Zeit t aufgenommene flächenbezogene Masse der Versuchsflüssigkeit, a den maximal erreichbaren Flüssigkeitsgehalt in kg/m² Saugfläche, während b mit der Einheit 1/h^{0.5} einen Faktor darstellt, der als längenbezogener Wassereindringkoeffizient sowohl Sauggeschwindigkeit wie auch Porenraumfüllung einbezieht. In der Formel findet sich der bisher als direkt proportional angesehene Wurzel-Zeit-Ausdruck an anderer Stelle, nämlich im Exponenten wieder. Auch läßt sich ein Wasseraufnahmekoeffizient w_0 in Form des Produkts $a \cdot b$ definieren. Falls das Materialgefüge im Kontakt mit der aufsteigenden Feuchtigkeit nicht merklich beeinflusst wird, sich also inert verhält, bleibt w_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ als ein regelrechter Kennwert erhalten. Wenn a dann durch Anstieg der Oberflächenspannung z. B. beim Zusatz eines Salzes erhöht oder aber dieselbe mit Hilfe eines Tensids erniedrigt wird, verändert sich b automatisch im umgekehrten Sinne. Der prüftechnische Aufwand zur Gewinnung dieser Parameter hält sich in Grenzen.

Anwendungsbereich

Obwohl man eine Anisotropie von Mörtel Eigenschaften grundsätzlich in Beanspruchungsrichtung, also bei aufgehendem Mauerwerk horizontal zu verfolgen hätte, ist das im Falle der kapillaren Feuchtigkeitsaufnahme von der berechneten Fläche her versuchstechnisch kaum durchzuführen, weil eine so kurze Wegstrecke gemeinhin dem Erhalt einer stabilen Ausgleichskurve des Kapillaraufstiegs im Wege steht. Möchte man aber auf einen Vergleich von entsprechenden Kennwerten nicht verzichten, so bietet sich allenfalls eine Untersuchung in Richtung längs der Mörtelscheibe an, auch wenn dabei die "genetisch" be-

dingte, durch die Schichtung vorgegebene Inhomogenität weitgehend ausgeglichen sein sollte. Auch dürften weitere Verfälschungen in einem ungünstigen Verhältnis von Querschnitt zur peripheren Verdunstungsfläche begründet sein. Die vorgestellte Verfahrensvariante eignet sich deshalb vorzugsweise für die Untersuchung von Proben geringer Dicke, wie beispielsweise Putzmörtel-Platten, die nur eine verhältnismäßig kurze Strecke für den kapillaren Flüssigkeitsaufstieg, d.h. nicht viel mehr als 10 cm, beinhalten und innerhalb von wenigen Stunden vollständig durchfeuchtet werden. Experimentell können Verfälschungen des Ergebnisses durch geometrische Unregelmäßigkeiten des Probekörpers, Auslaugung von löslichen Salzen und Quellvorgängen, besonders aber bei allzu kurzer Versuchszeit auftreten. Auch liefert diese Methode keine ausreichende Genauigkeit, wenn das Material von Natur aus Inhomogenitäten aufweist oder etwa mit Hydrophobierungs- bzw. Konservierungsmitteln vorbehandelt worden ist.

Prüfverfahren

Da also ein entsprechendes Vorgehen einen besseren Einblick in die Verhältnisse versprach, wurde eine besondere Wägeeinrichtung entwickelt. Die im ganzen gesehen geringe Masseaufnahme machte es aber notwendig, eine leichtgewichtige Konstruktion für die Apparatur vorzusehen. Dabei mußte eine ständige Korrektur des Flüssigkeitsspiegels und die entsprechende Nachlieferung in die Gesamtwägung des Systems einbezogen werden. Obschon der Masseverlust durch Verdunstung im Falle der betreffenden dünnplattigen Probekörper als merklich anzusehen war, wurde doch ein Einfluß auf die aktuelle Masse vernachlässigt. Da es sich schwierig gestaltete, den Spiegel der Versuchsflüssigkeit bei gleichmäßiger Wasserzufuhr durch einen seitlich am Gefäß angebrachten Überlauf konstant zu halten, erfolgte dies durch Absaugen mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe. Auf solche Weise, d.h. mit Hilfe einer engen Düse, läßt sich ein Niveaunterschied von 1/10 mm Höhe einhalten, was im vorliegenden Fall etwa einem Volumen von 5 cm³ Versuchsflüssigkeit entspricht. Bild 10 veranschaulicht das Prinzip der neuentwickelten Vorrichtung, die sich - wenn auch von erstaunlicher Einfachheit - doch als geeignet für den vorgesehenen Zweck erwiesen hat [64].

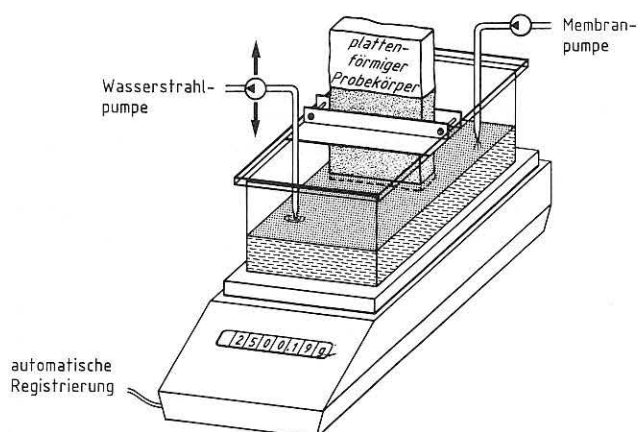


Bild 10: Ansicht des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Kapillaraufstiegs in Putzmörtel-Bruchstücken

Nach dem plötzlichen Eintauchen der vorgetrockneten Probeplatte bis zu einem Niveau, das vorher definiert worden ist, lassen sich in Zeitintervallen Ablesungen der aktuellen Masse vornehmen, oder aber die Ergebnisse automatisch registrieren, die den Erhalt eines kontinuierlichen Kurvenverlaufs gestatten. Dieser gehorcht erwartungsgemäß der Formel für den Kapillaraufstieg, wie sie für poröse Medien gefunden worden ist (vgl. hierzu auch [39] sowie [83], [90]). Dabei ist die Stabilität der Kurve umso geringer, je weiter die mit der Zeiteinheit zunehmende Wassermenge in die Nähe derjenigen rückt, die zum Erhalt der Konstanz des Niveauunterschieds erforderlich ist.

4.2.1.3 Wasserdampfdurchlässigkeit

Grundlage des Verfahrens

Die Durchlässigkeit für Wasserdampf ist in der Bau- und Isolationstechnik ein wichtiges Maß für die Beurteilung der Dämmwirkung von Materialien gegenüber gasförmiger Feuchtigkeit. Diese Eigenschaft, die auf dem Durchtritt von Wasserdampf durch den offenen Porenraum beruht, kann daher auch Veränderungen im Porengefüge anzeigen, wie sie beispielsweise im Zuge der Verwitterung von Baustoffen auftreten. Allerdings sind diese nur innerhalb bestimmter Grenzen zu erfassen, ein Problem, das auch bei der Bestimmung der spezifischen Gasdurchlässigkeit auftritt [72]. Anstelle von Wasserdampfdurchlässigkeit wird häufig der Begriff Wasserdampfdiffusion verwendet. Dies ist berechtigt, wenn der Durchgang von Dampf tatsächlich infolge einer Molekularbewegung innerhalb der praktisch ruhenden atmosphärischen Luft in den Poren erfolgt. Es besteht also ein Unterschied zu der laminaren Durchströmung des Materials als Folge einer Druckdifferenz, wie sie z.B. bei der Permeabilitätsmessung ausgenutzt wird, obwohl auch hier einige der gebräuchlichen Bezeichnungen, z.B. "Wasserdampf-Diffusionsstrom" (DIN 52 615 [13]) zunächst an einen derartigen Vorgang denken lassen. Im Gegensatz dazu wird die Wasserdampfdiffusion unter den normalen Druckverhältnissen der Atmosphärenluft ermittelt. Dabei beträgt die Differenz der Partialdrücke an beiden Enden der Probe, die für den Diffusionsstrom verantwortlich ist, meist nur etwa ein Zehntel bis ein Hundertstel. Außerdem nimmt ein Versuch zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit mindestens einige Tage, die der Luftpermeabilität dagegen nur weniger als eine Stunde in Anspruch.

Prüfverfahren

Orientiert man sich an DIN 52 615, so liegt folgendes Meßprinzip zugrunde: Der Probekörper bildet in der Versuchsanordnung den oberen Abschluß eines gläsernen Hohlzylinders, an dessen Rand er dampfdicht eingefaßt ist. In dem Behälter herrscht eine definierte relative Luftfeuchte (r.F.), erzeugt - im Falle des sogenannten Trockenbereichsverfahrens (dry-cup method) - durch ein wasserabsorbierendes Medium, während sich die ganze Vorrichtung in einer Klimakammer befindet, in der eine davon

abweichende, jedoch gleichfalls konstante relative Luftfeuchte aufrechterhalten wird. Um etwa bei hygroskopischem Verhalten unkontrollierbare Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts im Material zu vermeiden, sollte es zuvor ausreichend lange im für den Versuch vorgesehenen Klimaraum gelagert werden. Gemessen wird die Wasseraufnahme des Sorbens, indem man das ganze Gefäß in bestimmten Abständen wägt, bis sich eine konstante Massezunahme eingestellt hat. Diese wird über mehrere Tage verfolgt und aus der resultierenden Geraden der Wasserdampf-Diffusionsstrom bestimmt. Angaben über Proben dimensionen und -beschaffenheit, Klimabedingungen, die notwendigen Sorbentien und weitere technische Einzelheiten sind der genannten Norm zu entnehmen.

Probenvorbereitung

Für den vorliegenden Fall empfiehlt es sich, die Putzmörtelproben von ihren Basisplatten (vgl. Bild 5) abzulösen, daraus kreisrunde Scheiben von wenig mehr als 80 mm Durchmesser und gleichmäßiger Dicke herauszuarbeiten sowie bei vorgegebenem Klima - hier 50 % r.F. bei 20 °C - über mehrere Tage den Umgebungsbedingungen anzupassen. Vom Bauwerk entnommene Proben erfahren eine gleichartige Vorbehandlung. Die derart erhaltenen Mörtelzylinder werden dann mantelseitig mit einer Wachsschicht versehen, ebenfalls mit Hilfe von Wachs bzw. Dichtungsmasse in eine ringförmige Aluminium-Einfassung eingepaßt, das ganze anschließend in den vertieften Rand des Glasgefäßes, in dem sich das Sorbens befindet, eingebettet und entlang der gesamten Peripherie dampfdicht verschlossen (vgl. Bild 11). Hier zeigt sich einer der Vorzüge des Verfahrens gegenüber dem der Gaspermeabilität: Während man dort wegen der angelegten Druckdifferenz eine seitliche Abdichtung des Umfangs der zylinderförmigen Proben in manchen Fällen nur durch Aufpressen einer Gummimanschette erreicht, entfällt hier eine solche nicht gerade schonende Behandlung, weshalb sich das Verfahren für bröckeliges und dünnschichtiges Material empfiehlt.

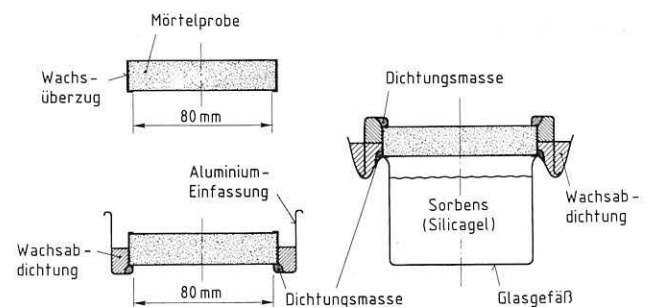


Bild 11: Skizze der Halterung für Mörtelproben sowie des Versuchsgefäßes für die Bestimmung ihrer Wasserdampfdurchlässigkeit

Funktionsweise

Die Ermittlung der Wasserdampfdiffusion erfolgt nach dem Trockenbereichsverfahren. Die Anforderungen an das Klima beinhalten eine Temperatur von 23 °C und eine relative Feuchte von 50 ± 3 %. Für den Versuch beträgt sie über dem als Sorbens dienendem Silicagel 0 - 3 % r.F. bei 20 ± 1 °C.

Darstellung der Ergebnisse

Aufgrund der Versuchsbedingungen und der Probenabmessungen dienen zur Auswertung die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d in m und die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ . Letztere ist dimensionslos und stellt den Quotienten aus dem Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten der Luft σ_L und dem des betreffenden Probenmaterials in $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$ dar (Krischer und Kast [49]). Die Berechnung erfolgt nach den Gleichungen

$$s_d = \sigma_L \cdot A \cdot \frac{p_1 - p_2}{I} - s_L$$

$$\mu = \frac{1}{s} \left(\sigma_L \cdot A \cdot \frac{p_1 - p_2}{I} - s_L \right)$$

$$\mu = \frac{s_d}{s}$$

Hierbei sind:

- A die Prüffläche der Probe in m^2 ,
- p_1, p_2 der Wasserdampfpartialdruck jeweils auf beiden Seiten der Probe in Pa,
- I der Wasserdampf-Diffusionsstrom in kg/h ,
- s die mittlere Dicke der Probe in m und
- s_L die mittlere Dicke der Luftschicht unterhalb der Probe in m.

4.2.1.4 Spezifische Oberfläche (Gasadsorption)

Grundlage des Verfahrens

Die Gesamtoberfläche eines Materials ergibt sich aus den äußeren geometrischen Begrenzungen und der inneren Oberfläche seiner Komponenten. Letztere setzt sich aus der Gesamtheit der Oberflächen der Porenwandungen und jener der Teilchen zusammen. Diese können nur erfaßt werden, wenn sie für die Sorption eines Gases zugänglich sind. Man verwendet hierfür die Tieftemperatur-Stickstoff-Adsorption nach Brunauer, Emmett und Teller (BET-Methode) [4], die sich als Standardverfahren bewährt hat. Ermittelt wird die Abhängigkeit der adsorbierten Gasmenge vom Gleichgewichts-Gasdruck p bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs. In einem bestimmten Druckbereich kann man die Adsorptionisotherme als Gerade darstellen, aus deren Steigung und Achsenabschnitt sich die Kapazität einer Monoschicht errechnet, worunter man die Anzahl von Gramm-Molen

des Gases versteht, die zur Bildung einer monomolekularen Schicht auf der Oberfläche von 1 g Substanz benötigt wird. Mit Hilfe der Loschmidtschen Zahl und dem Flächenbedarf für ein adsorbiertes Stickstoffmolekül erhält man schließlich die spezifische Oberfläche. Die Grundlagen des Verfahrens werden in DIN 66 131 behandelt [14].

Anwendungsbereich

Das Reaktionsverhalten eines Stoffes im Kontakt mit seiner Umgebung wird u.a. durch die Größe seiner Oberfläche bestimmt, wie es im Falle von Absorbentien wie Aktivkohle oder von Katalysatoren augenfällig wird. Auch die "Abbinde"-Eigenschaften von Gips, Zement, Kalk oder auch bildsamen Massen werden durch die spezifische Oberfläche bzw. Teilchengröße des Materials beeinflusst. Das Verfahren der Tieftemperatur-Stickstoff-Adsorption ist weit verbreitet und findet bei allen porösen Feststoffen Anwendung. Diskutiert wird sie im einschlägigen Schrifttum (Fagerlund [20], Gall [23], Gregg [25], Haul und Dumbgen [31], John und Severin [47] sowie Orr und Dallavalle [74]).

Probenvorbereitung

Die für die Untersuchung erforderliche Probenmasse richtet sich nach der zu erwartenden spezifischen Oberfläche. Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß bei großer Einwaage die Volumenkonstanz des Meßgefäßes nicht mehr gegeben ist. Es empfiehlt sich, das Material vor Versuchsbeginn bis zur Massekonstanz zu trocknen. Dabei ist bei hydratwasserhaltigen Proben darauf zu achten, daß die Temperatur nicht zu hoch gewählt wird, da sonst die Kristallstruktur, wie z.B. im Falle von Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, zerstört werden kann, womit eine Erhöhung der spezifischen Oberfläche verbunden ist. Dies gilt auch für das anschließende Ausheizen im trockenen Stickstoffstrom. Bei empfindlichem Material (Tonen etc.) sollte die Probe deshalb nur evakuiert werden. Ist ausgeheizt worden, läßt man anschließend die Adsorptionsgefäße unter strömendem Meßgas auf Raumtemperatur abkühlen; die evakuierten Gefäße werden mit Stickstoff gefüllt. Das Verschließen der Gefäße mit einem Stopfen beendet die Probenvorbereitung.

Funktionsweise

Die Bestimmung erfolgt anhand des Einpunkt-Differenz-Verfahrens nach Haul und Dumbgen (DIN 66 132 [15]). Dazu ist ein von der Firma Ströhlein gebautes Oberflächenmeßgerät "Areameter" eingesetzt worden, bei dem man die adsorbierte Gasmenge volumetrisch ermittelt. Ein Adsorptionsgefäß mit der Probe und ein Referenzgefäß von demselben Volumen werden bei Raumtemperatur mit Stickstoff bei Druckgleichheit (Atmosphärendruck) gefüllt und anschließend auf die Temperatur des flüssigen Stickstoffs abgekühlt. Die Aufnahme des Meßgases durch die Probe bewirkt einen Druckunterschied zwischen Adsorptions- und Vergleichsgefäß, der an einem Öl-Differentialmanometer abzulesen ist. Daraus sowie aus dem Einfülldruck (Atmosphärendruck) kann die von der Probe adsorbier-

te Stickstoffmenge berechnet werden. Der Gleichgewichtsdruck im Adsorptionsgefäß stellt sich aufgrund der Abkühlung automatisch innerhalb des BET-Bereichs ein. Die Oberflächengröße wird nach der BET-Theorie berechnet, wobei man eine "Ein-Punkt"-Auswertung zugrundelegt.

Darstellung der Meßergebnisse

Die in m^2 erhaltene Oberfläche wird in der Regel auf die Masse der Probe bezogen, und zwar auf 1 g. Eine volumenbezogene Angabe ist häufig schwierig, hat sich mitunter aber als zweckmäßig erwiesen. Da das Porengefüge einer verwitterten Probe gegenüber ihrem unverwitterten Äquivalent Veränderungen erfahren hat, liefern Oberflächenwerte interessante Anhaltspunkte für chemische Umsetzungen. Die Interpretation der Ergebnisse sollte jedoch stets einem Fachmann überlassen bleiben. Die mit dem vorhandenen Gerät erfaßbare Oberfläche reicht von ca. 0,1 - 1000 m^2/g , wobei im Falle von 1 g Einwaage Werte zwischen ca. 6 und 50 m^2/g angezeigt werden. Für andere Größenbereiche muß die Einwaage entsprechend verändert werden.

4.3 Mechanische Festigkeit

Im Verlauf der Arbeit stellt sich irgendwann die Frage, wie der Widerstand von derartigem Material gegen mechanische Beanspruchung gekennzeichnet werden kann. In dieser Hinsicht mag beispielsweise eine Arbeit von Graf [24] als Kostprobe dafür dienen, wie unterschiedlich Gefügezusammenhalt im Sinne der Kornbindung oder Herstellung und Lagerung ihren Niederschlag in den klassischen Festigkeitswerten finden. Dabei kommt es natürlich darauf an, ob man in erster Linie den Anschluß an bereits vorhandene Daten oder aber eine bessere Aussage über das Gefüge anstrebt. Hier den richtigen Weg zu gehen, bleibt letztlich dem Geschick des Beurteilenden überlassen. Auf eine quantitative Erfassung etwa der Biegefestigkeit an nicht eigens hierzu hergestellten Probekörpern wurde verzichtet. Grund hierfür war vor allem, daß bei der Sprödhheit des Materials und durch präparative Einflüsse begünstigt mit einer empfindlichen Kerbstellenwirkung gerechnet werden mußte. Die Untersuchung beschränkte sich deshalb auf die Ermittlung des Schleifverschleißes.

4.3.1 Verschleiß

Grundlage und Ziel des Verfahrens

Es empfiehlt sich, bei der Beurteilung von Putzmörteln eine Beanspruchungsart zu wählen, in der die Festigkeit des Verbunds zwischen Zuschlagkörnern und Bindemittel zum Ausdruck kommt, wie sie beispielsweise durch den Verschleiß gegeben ist. Auf diesem Wege kann man eine Aussage über den Materialzusammenhalt gewinnen, der in der Praxis der Expansion gefrierenden Wassers oder kristallisierender Salze Widerstand entgegengesetzt. So dient das Verfahren mit der Schleifscheibe nach Böhm der Kennzeichnung des Verhaltens von festen bis hochfesten Gesteinen gemäß der Beschreibung in DIN 52 108 [12].

Anwendungsbereich

Dieser Versuch erweist sich im Falle des strukturellen Zusammenhalts von weniger festen Materialien jedoch als ungeeignet, weil sich dabei zu hohe Verschleißraten je Prüfperiode ergeben. Deshalb war die Entwicklung einer passenden Methode erforderlich [36], [57], um eine sensiblere Bewertung des Materialwiderstands gegen den Schleifverschleiß und somit des Abtrags je Zeiteinheit bzw. Prüfzyklus zu gewährleisten. Ein solches Verfahren ist besonders aber für die Charakterisierung von Tiefenprofilen unterschiedlicher mechanischer Festigkeit interessant, wie sie als Folge der von der Oberfläche her einwirkenden Verwitterung entstehen.

Funktionsweise

Als Grundgerät dient der vom amerikanischen Porcelain Enamel Institute für die Prüfung von Glasuren keramischer Fliesen entwickelte P.E.I. Abrasion Tester (vgl. ASTM C 448-88 [2]). Es ist derart verändert worden, wie es in einer RILEM-Empfehlung zur Prüfung von Werkstein Erwähnung gefunden hat [78]. Bei diesem wird der auf einem Exzenter gelagerte Spannteller derart geführt, daß sich die darauf befestigten quadratischen Probeplatten auf horizontalen Kreisen bewegen. Eine aufliegende Kreisscheibe aus einem Wolframcarbid-Sinterwerkstoff bewirkt den fortschreitenden Verschleiß der Probenoberfläche dadurch, daß sie die als Schleifmittel verwendeten Borcarbidkörner in Bewegungen versetzen, wie sie in einer Scheibenschwingmühle auftreten (Bild 12).

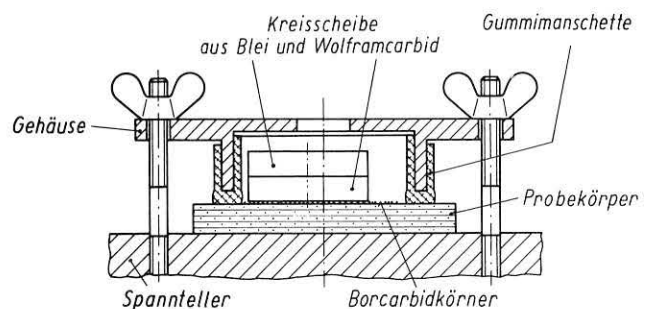


Bild 12: Einspannvorrichtung mit Probe für die Oberflächenverschleißprüfung

Darüber hinaus ist es erforderlich gewesen, den Antrieb für die Plattform mit dem Ziele umzubauen, beim Versuch deren ruckweises Anlaufen bzw. Auslaufen und damit unerwünschte Taumelbewegungen der zylindrischen Schleifkörper zu vermeiden. Das geschieht durch Einfügen einer hydromechanisch arbeitenden Fliehkraftkupplung zwischen Motor und Getriebe, deren Einstellung in Vorversuchen optimiert worden ist. Nach jedem Beanspruchungszyklus wird die Verschleißfläche mit Hilfe eines Druckluftstroms gereinigt. Den Bewegungsablauf des zylindrischen Schleifkörpers hat man sich so vorzustellen, daß die Schleifmittelteilchen auf der Probe Hypozykloiden-Bahnen beschreiben. Eine freie Wahl der Anzahl der Umdrehungen des Geräteexzenter ermöglicht es, auch geringe Materialmengen abzutragen. Voraussetzung

dafür ist allerdings, daß plane Flächen von hinreichender Größe vorliegen, d.h. auf einer Probeplatte von wenigstens 10 cm Kantenlänge und höchstens 3 cm Dicke sollte eine Verschleißfläche von 8,6 cm Durchmesser zur Verfügung stehen. Auch darf das Material weder zu bröckelig noch zu grobporig oder -körnig, sondern muß von möglichst gleichmäßigem Gefügebau sein. Als bestes Auswertkriterium erweist sich unter den gegebenen Bedingungen die Ermittlung der Höhendifferenz zwischen zwei Beanspruchungszyklen. Bei rauhem Material, wie es allgemein vorliegt, dient hierfür üblicherweise eine Meßuhr mit kugelgelagertem Tastkopf von ringförmiger Auflagefläche (Bild 13).

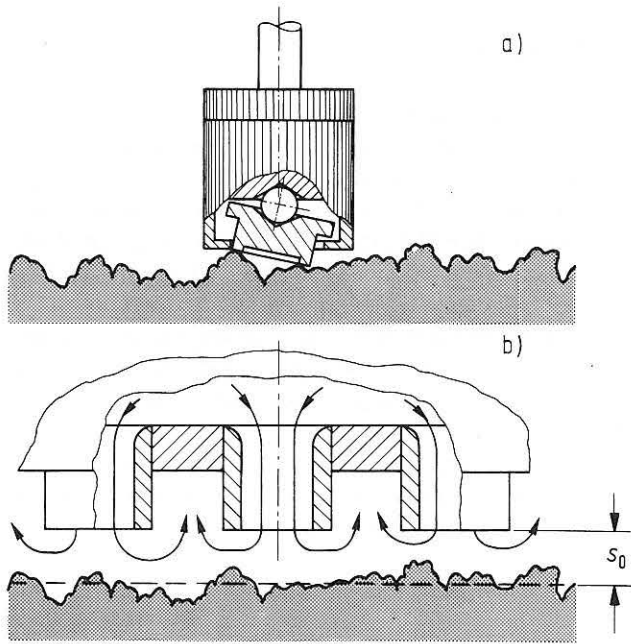


Bild 13: Antasten rauher Oberflächen
a) mechanisch: mit beweglich gelagertem Tastkopf
b) pneumatisch: berührungslos mit Vielfach-Meßdüse
(s_0 = Abstand zur mittleren Meßebeune)

Dessen Handhabung ist aber ziemlich zeitaufwendig, zumal zahlreiche Einzelmessungen erforderlich sind und gelegentlich abweichende Werte beim Aufsetzen des Tastkopfs auf größere Poren erhalten werden. Abhilfe liefert hier die berührungslose Antastung mit einer pneumatischen Vielfachdüse [56], [57]. Während des Meßvorgangs wird sie in der Höhe so eingestellt, daß der gesamte Abströmungsquerschnitt gleich einer Konstanten ist und bei jeder Bestimmung der gleiche Abstand von der mittleren Meßebeune s_0 eingehalten wird (Bild 14). Dazu muß man die durch die Düsenenden gebildete Front solange in vertikaler Richtung verschieben, bis der am Manometer angezeigte Druck den Wert "Null" erreicht hat, was bei 0,8 mm Abstand von der erwähnten Ebene der Fall ist. Sie entspricht nämlich etwa einer Fläche, die entstände, wenn man die Erhebungen über der Verschleißfläche abtragen und die Täler damit auffüllen würde, und befindet sich zwischen den tiefsten Tälern und höchsten Erhebungen der beanspruchten Oberfläche. So wird die Bestimmung der mittleren Höhenänderung der rauhen Oberfläche auf die Messung der Höhenänderung der Vielfachdüse zurückgeführt, deren Position man an einer Meßuhr ablesen kann (manuelle Wegkompensation). Auf diesem Wege läßt sich der Zeitaufwand auf weniger als etwa 5 % des für die mechanische Methode erforderlichen senken. Das Verfahren gestattet die Antastung von Oberflächen mit einer maximalen Rautiefe von etwa 1,4 mm, sofern die mittlere Meßebeune senkrecht zur Düsenachse steht. Ein nützlicher Nebeneffekt ist, daß die Verschleißfläche von Schleifmittel- und Abriebteilchen durch den Luftstrom stets freigehalten wird. Vergleichsversuche liefern keine Anhaltspunkte für nennenswerte Unterschiede zwischen den nach beiden Verfahren gewonnenen Ergebnissen.

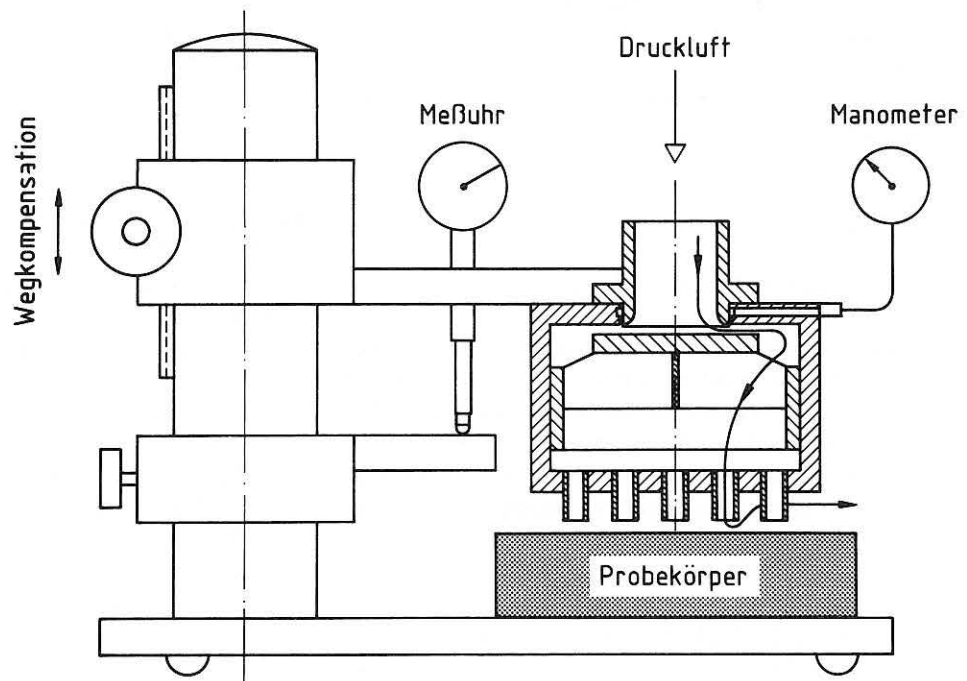


Bild 14:
Dickenmessung durch
pneumatische Antastung

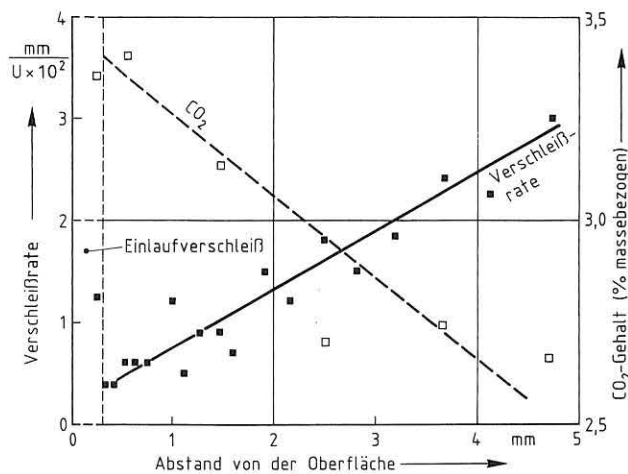


Bild 15: Verschleißprofil eines im Labor hergestellten Dolomitmörtels: Dickenverlust und zum Vergleich die CO_2 -Aufnahme

Bei der Deutung von Tiefenprofilen nach Art der in Bild 15 ist zu beachten, daß sich nach Versuchsbeginn eine methodisch bedingte, aber auch materialspezifische Oberflächenrauheit einstellen muß. Dieser, durch Anpassung an die Beanspruchungsfläche erhaltene, dem sogenannten Einlaufverschleiß entsprechende Beitrag kann nicht von der eigentlichen Verschleißrate unterschieden werden, was zur Vergrößerung der Meßunsicherheit führt. Das Diagramm zeigt übrigens, daß in einem späteren Stadium die Erhärtung der Dolomitmörtelkomponente mit der Carbonatisierung parallel läuft. Darüber hinaus eignet sich das Verfahren zur Festlegung eines Materialkennwerts von näherungsweise homogenen Baustoffen, soweit man berücksichtigt, daß dieser lediglich innerhalb des vorliegenden tribologischen Dreikörper-Systems gültig ist.

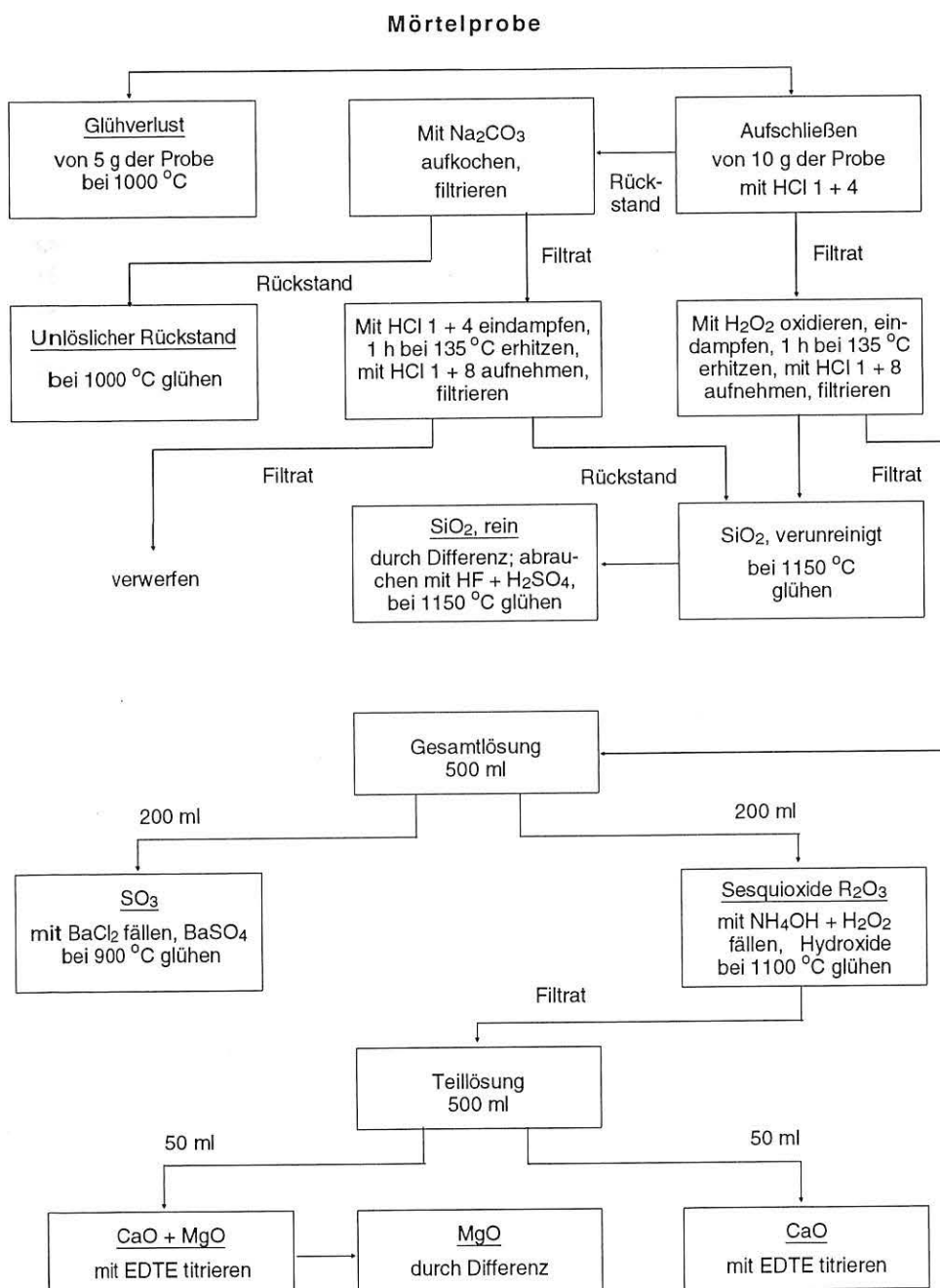


Bild 16: Blockschemata eines Analysengangs für Mörtel

4.4 Chemische Zusammensetzung

Chemische Veränderungen des Putzmörtels sind - vom Carbonatisierungsvorgang und von unzulässigen Bindemittelbeimischungen einmal abgesehen - vielfach eher Begleiterscheinungen, als daß sie dessen Gefüge maßgeblich zu beeinflussen imstande wären. Um so mehr spielt der physikalische Prozeß des Lösungstransports eine Rolle, zumal er in der Regel Hauptursache einer Umordnung der Mineralphasen darstellt, die meist für die Dispersität des Mörtels verantwortlich ist. Daher soll hier - abweichend von der in der Baustoffkunde üblichen Reihenfolge bei der Beschreibung von Eigenschaften und Merkmalen - die chemische Analyse erst an dieser Stelle nähere Behandlung erfahren.

4.4.1 Analysenverfahren

Um Art und Ausmaß des Einflusses beurteilen zu können, die schwefel- und stickstoffoxidische sowie chloridhaltige Luftverunreinigungen auf die aufgehenden Putz- und Natursteinflächen ausüben, ergibt sich die Notwendigkeit, charakteristische Bestandteile, wie Sulfat, Sulfit, Carbonat, Nitrat, Nitrit und Chlorid quantitativ zu erfassen. Hierzu werden gravimetrische, coulometrische und ionenchromatografische Bestimmungsmethoden sowie die energie-dispersive Röntgenanalyse herangezogen, deren Eigenheiten Gegenstand der folgenden Beschreibung sind. Besonders für Ober- und Unterputz von Gebäuden bot sich ein bewährter Analysengang an, dessen Ablauf im *Bild 16* dargestellt wird. Diese Verfahrensweise dient zur Kennzeichnung der Art des verwendeten Bindemittels sowie des Mischungsverhältnisses - vorausgesetzt, daß der salzsäurelösliche Anteil im Zuschlag bekannt oder zu vernachlässigen ist. Manchmal werden allerdings auch besondere Bestimmungen erforderlich.

4.4.1.1 Gravimetrische Analyse

Grundlage des Verfahrens

Neben der Volumetrie (Maßanalyse) gehört die Gravimetrie (Gewichtsanalyse) zu den klassischen quantitativen chemischen Methoden. Ihr Wesen besteht darin, daß das hier zu bestimmende Sulfation SO_4^{2-} in eine schwerlösliche Verbindung bekannter Zusammensetzung (Bariumsulfat BaSO_4) überführt, der Niederschlag von anhaftenden Verunreinigungen befreit und schließlich gewogen wird. Die bei der Fällung mit Bariumchloridlösung (BaCl_2) ablaufende Reaktion erfüllt die an gravimetrische Bestimmungen geknüpften Bedingungen eines schwerlöslichen, für die zu bestimmende Komponente spezifischen und vollständig filterbaren Niederschlags, der zudem noch einfach und reproduzierbar in eine stabile definierte Verbindung, die "Wägeform", überführbar ist. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist eine mengenmäßige Erfassung des als Sulfit, Sulfit oder als Sulfat vorliegenden Schwefels möglich. Liegen diese Verbindungen nebeneinander vor, so läßt sich nach entsprechender Oxidation der Gesamtschwefelgehalt über die Sulfatbestimmung ermitteln.

Anwendungsbereich

Die gravimetrische Methode findet bei der Untersuchung anorganisch-nichtmetallischer Baustoffe, z.B. bei Bindemitteln, Mörteln und Beton Anwendung. Vorzugsweise wird damit Sulfid bestimmt, während Calcium- und Magnesiumoxid komplexometrisch ermittelt werden (vgl. DIN EN 459 Teil 2 [8] und DIN EN 196 Teil 2 [18]).

Probenvorbereitung

Die chemische Zusammensetzung läßt sich an Mörtelproben ermitteln, die zuvor auf vollständigen Durchgang durch den Drahtsiebboden nach DIN 4188 [9] mit 0,63 mm Maschenweite zerkleinert und je nach Art des erwarteten Bindemittels zwischen 40 und 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet worden sind. Dabei sollte das Größtkorn nur wenig unterhalb von 0,63 mm liegen, weil die Löslichkeit des Zuschlags in Säure mit zunehmender Mahlfeinheit merklich ansteigt.

Funktionsweise

Das Verfahren setzt voraus, daß sich der zu bestimmende Bestandteil in Lösung befindet, die im Falle des Sulfats bei Mörteln und Betonen von saurer Natur ist. Dies hängt damit zusammen, daß das Sulfation bei einem Überschuß an Calcium in Form von Calciumsulfat vorliegt, dessen Löslichkeit in verdünnter Salzsäure weitaus höher als in destilliertem Wasser ist. Die Fällung der Sulfationen erfolgt mit heißer Bariumchloridlösung im kieselensäurefreien Filtrat des Aufschlusses. Nach mehrstündigem Stehen bei Raumtemperatur wird der Niederschlag abfiltriert und ausgewaschen. Daran schließt sich das Veraschen des Filters sowie das Glühen des Rückstands bis zur Massekonstanz an.

Darstellung der Ergebnisse

Aus der Masse des Niederschlags und seiner Zusammensetzung läßt sich beispielsweise die Menge des Sulfats berechnen. Das Ergebnis wird in Prozent, bezogen auf den Masseanteil, oder in ppm angegeben.

4.4.1.2 Coulometrische Titration

Grundlage des Verfahrens

Hierunter versteht man die Messung der elektrischen Ladungsmenge mit Hilfe einer nach den Faradayschen Gesetz umgesetzten Stoffmenge. Voraussetzung dafür ist eine quantitative Stromausbeute, d.h. es dürfen keine unkontrollierbaren Nebenreaktionen ablaufen. Da bei konstanter Stromstärke gearbeitet wird, ist die in einer bestimmten Zeit umgesetzte Substanzmenge ein Maß für diese Ladungsmenge, wodurch quantitative Analysen möglich werden.

Anwendungsbereich

Die Coulometrie hat sich bei der Durchführung quantitativer Analysen bewährt. Nach der Methode von O e l s e n - A b r e s c h lassen sich durch coulometrische Titration der Gesamtkohlenstoff als CO_2 und der Gesamtschwefel als SO_3 ermitteln. Das Verfahren wird seit geraumer Zeit zur Bestimmung von Kohlenstoffdioxid in Kalksteinen und Baukalken (O h n e m ü l l e r und S o l f [73]) sowie von Gesteinen (H e r r m a n n und K n a k e [32]) eingesetzt. Es findet Anwendung für CO_2 -Gehalte von etwa 40 ppm bis 73 %. Auch lassen sich mit seiner Hilfe schnell und hinreichend genau kalk- und sulfathaltiges Material analysieren.

Probenvorbereitung

Allgemein verwendet man eine pulverisierte, bis zur Massekonstanz getrocknete Probe, für die eine Korngröße von $\leq 0,125$ mm bevorzugt wird. Im Falle von größerem Material besteht die Gefahr, daß eine quantitative Umwandlung des Sulfats in SO_2 bzw. des Carbonats in CO_2 in einem angemessenen Zeitraum nicht sichergestellt werden kann. Bei zu langer Nachtitration würde darüber hinaus das Ergebnis verfälscht. Enthält das Material nur Carbonat, so kann bei 105°C vorgetrocknet werden, liegt daneben aber auch Sulfat (in den Proben meist als Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vor, so sollten 40°C nicht überschritten werden, da sonst das Dihydrat zu Halbydrat entwässert und eine falsche Bezugsmasse vorgetauscht wird. Die Einwaage richtet sich nach dem Carbonat- bzw. Sulfatgehalt des Materials.

Funktionsweise

Die Probe wird im getrockneten CO_2 - und SO_2 -freien Stickstoffstrom bei 1100°C zersetzt, wodurch das vom Carbonat stammende Kohlenstoffdioxid entweicht. Die Verbrennungsgase werden über eine Perhydritvorlage geführt, welche die in der Probe enthaltenen Oxidationsprodukte des Schwefels absorbiert. Der Gasstrom gelangt dann in ein mit Bariumperchlorat gefülltes Titriergefäß. Durch Absorption des CO_2 erniedrigt sich der pH-Wert der alkalisch eingestellten Lösung bei gleichzeitiger Bildung von Bariumcarbonat. Mit Hilfe von elektrolytisch erzeugtem Bariumhydroxid wird automatisch auf den pH-Ausgangswert zurücktitriert. Die verbrauchte Elektrizitätsmenge ist aufgrund des Faradayschen Gesetzes ein Maß für den Kohlenstoffgehalt der Probe. Das Verfahren arbeitet leitprobenfrei.

Bei der Bestimmung des SO_3 -Anteils ist die Prozedur ähnlich, jedoch muß die Probe auf ca. 1350°C erhitzt werden, um eine quantitative Zersetzung von Calciumsulfat zu gewährleisten. Das freiwerdende Schwefeldioxid wird in eine saure Natriumsulfatlösung eingeleitet, die mit Wasserstoffperoxid versetzt worden ist. Durch elektrolytisch erzeugtes Natriumoxid erfolgt eine automatische Rücktitration auf den pH-Ausgangswert. Den Sulfitanteil erhält man durch Freisetzen von SO_2 mit Hilfe verdünnter

Phosphorsäure. Durch Subtraktion des Sulfitanteils vom Gesamtschwefelgehalt erhält man so die Summe von Sulfat und Sulfid.

Darstellung der Ergebnisse

Je nach Bedarf können die Ergebnisse als Gesamtkohlenstoff oder Kohlenstoffdioxidgehalt in %, jeweils bezogen auf die Einwaage, angegeben werden. Die Ergebnisse der Schwefelbestimmung erhält man durch Umrechnung je nach den Erfordernissen als Prozentanteil für Gesamtschwefel, Sulfat (SO_4^{2-}), Sulfid (SO_3^{2-}) als SO_3 oder SO_2 jeweils bezogen auf die Einwaage.

4.4.1.3 Ionenaustausch-Chromatografie

Grundlage des Verfahrens

Nachdem Mitte der sechziger Jahre die herkömmliche Säulenchromatografie dank der Entwicklung der "High Performance Liquid Chromatography" (HPLC) einen außerordentlichen Fortschritt zu verzeichnen hatte, begann 1975 speziell für die Bestimmung von Ionen eine ähnliche Systemverbesserung, die zur Methodik der "Ionenchromatografie" (IC) geführt hat (S m a l l e t a l. [86]). Beiden Verfahren gemeinsam sind die bessere Auftrennung von Stoffen bzw. Ionen und eine kürzere Analysenzeit sowie die direkte Kombination von chromatografischen Trennsystemen mit unterschiedlichen hierfür geeigneten Detektoren. Diese bestimmen auch die analytische Leistungsfähigkeit. Den Trennungen liegen Ionenaustauschvorgänge an entsprechenden Säulen geringer Kapazität mit schwach dissoziierten Eluenten zugrunde [35].

Die Meßanordnung besteht im wesentlichen aus einer Förderpumpe, einer Ionen-Austauschersäule und einem Detektor. Die Pumpe arbeitet entsprechend dem heutigen technischen Stand mit einem oder mit zwei Kolben, wobei ihre druckbezogene Fördercharakteristik pulsationsfrei sein muß. Bei der Wahl einer geeigneten Trennsäule ist man nicht nur auf ein Produkt festgelegt, da alle technischen Teile nach dem HPLC-Standard gefertigt werden. Zum Einsatz kommen Leitfähigkeits (Conductivity-), UV- bzw. UV/VIS-, Refraktometer- (RI-), amperometrische, potentiometrische und elektrochemische (EC-) Detektoren, und zwar je nach Art der zu bestimmenden Ionen. Die Pumpe fördert eine Lösung, auch Eluent oder mobile Phase genannt, aus einem Reservoir ständig mit einem bestimmten Druck durch das System, wobei sich letzterer abhängig von der vorgegebenen Durchflußrate einstellt. Die Probenaufgabe erfolgt über eine Verbindungsschleife aus chemisch inertem Material, die über ihre jeweilige Länge ein bestimmtes Volumen darstellt.

Mit diesem Verfahren steht ein analytisches Hilfsmittel zur Verfügung, mit dem sich auch geringe Konzentrationen von sowohl Kationen als auch Anionen erfassen lassen, was für die Immission von einigen reaktiven Luftverunreinigungen von besonderem Interesse ist. Im folgenden wird das Prinzip der Apparatur dargestellt (Bild 17).

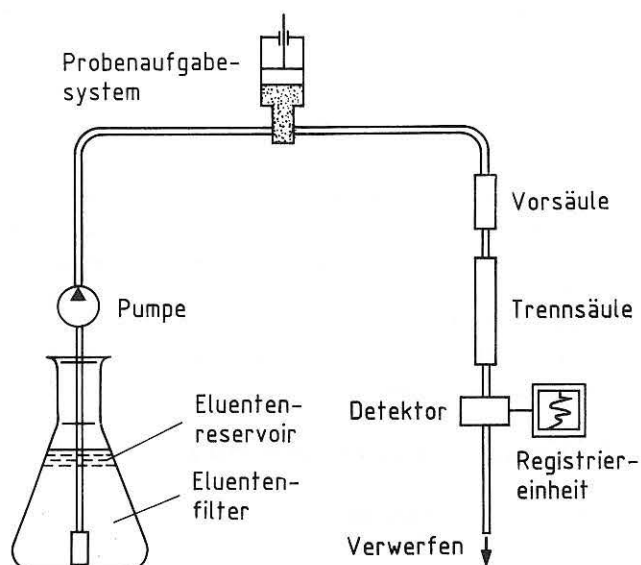


Bild 17: Schematische Darstellung des Verfahrens der Ionenaustausch-Chromatografie

So können die interessierenden Ionen quantitativ mit Hilfe eines geeigneten Geräts erfaßt werden, das in Zusammenarbeit der Firmen Hitachi und Merck entwickelt worden ist und nach Analysenvorschriften der letzteren mit computergestützter Auswertung der Daten arbeitet. Die Anlage verfügt zur Trennung von Fluorid, Chlorid, Nitrit, Bromid, Nitrat, Sulfit und Sulfat sowie Natrium-, Ammonium-, Kalium-, Rubidium-, Cäsium-, Magnesium und Calcium-Ionen über Säulen der Typen RT Polyspher IC-AN-1 mit einem Kugeldurchmesser von $12\ \mu\text{m}$ und IC-CA, beide von der Fa. Merck. Für die genannten Anionengruppen kommt als Eluent ein Gemisch wäßriger Lösungen von Phthalsäure ($c = 1,5 \cdot 10^{-3}\ \text{mol/l}$), Tris(hydroxymethyl)aminomethan ($c = 1,38 \cdot 10^{-3}\ \text{mol/l}$) und Borsäure ($c = 0,3\ \text{mol/l}$) bei einer Durchflußrate von $1,5\ \text{ml/min}$ und einem Druck von $30\ \text{bar}$ in Betracht, während für die angeführten Kationen als mobile Phase wäßrige Cer(III)sulfatlösung mit einer Konzentration von $0,0001\ \text{mol/l}$ Verwendung findet. Dabei haben die Durchflußrate $1,5\ \text{ml/min}$ und der Druck $143\ \text{bar}$ betragen. Die Detektoren zur Analyse der Anionen basieren auf der Messung der Leitfähigkeit, während die Kationenbestimmung mit Hilfe der UV-Fotometrie bei einer Wellenlänge von $254\ \mu\text{m}$ erfolgt.

Anwendungsbereich

Das beschriebene Verfahren eignet sich sowohl zur selektiven wie auch zur simultanen Bestimmung von ein- und zweiwertigen Ionen in Gemischen. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit bis in den ppb-Bereich, der kurzen Analysenzeit und der meist einfachen Probenvorbereitung stellt es eine wichtige Ergänzung zu naßchemischen und voltametrischen Verfahren dar. Analysen von Proben mit Chlorid-, Nitrat-, Nitrit-, Sulfat-, Sulfit-, Alkali- und Erdalkalitionen, wie sie u.a. in der Lebensmittel- und Wasseranalytik, aber auch bei der chemischen Charakterisierung von Baustoffen anfallen, gehören hierher. Zur Bestätigung der Ergebnisse wurden alternativ klassische chemische Verfahren eingesetzt.

Probenvorbereitung

Man kann entweder nur einen halbquantitativen Einblick in die lokale Elementverteilung beispielsweise mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenmikroanalyse gewinnen oder aber Schichten definierter Dicke abtragen, von denen man dann jeweils einen integrierenden Wert für die chemische Zusammensetzung oder eines Porenmerkmals erhält. Beim millimeterweisen Abtragen von definierten Probemengen tauchen mitunter aber Schwierigkeiten auf: Da das Bohrgestänge verwindungssteif ist, kann es bei Belastung nicht ausweichen, und das Schneidwerkzeug dringt leicht in das Material ein, so daß manchmal durch seine Schneidkanten spröde Partien erfaßt werden, die dann ausbrechen. Diese liegen häufig unterhalb des abgetragenen Niveaus, weshalb sie zu verwerfen sind.

Für die Präparation des schichtweise abgetragenen Putzmörtels wird dieser bei $40\ ^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet und derart zerkleinert, daß er durch ein Prüfsieb der Maschenweite $0,5\ \text{mm}$ nach DIN 4188 [9] hindurchgeht. Die Extraktion einer Durchschnittsprobe im Verhältnis von $1\ \text{g}$ Substanz zu $50\ \text{ml}$ Wasser erfolgt anschließend in entsalztem und danach destilliertem Wasser bei Raumtemperatur unter Schütteln, und zwar $2\ \text{Stunden}$ lang. Eine filtrierte Lösung dient zur Durchführung der chemischen Untersuchung.

Funktionsweise

Die in der wäßrigen Lösung vollständig dissoziiert vorliegenden Salze von Alkali- und Erdalkaliverbindungen führt man mit Hilfe einer Spritze über eine Probenschleife dem Eluentenstrom zu, der sie dann durch die gewählte Austauschersäule hindurchleitet. Das verwendete Trennmateriale trägt eine funktionelle Gruppe mit einer fixierten Ladung. In deren Nähe befindet sich das entsprechende Gegenion, so daß die Gruppe nach außen hin elektrisch neutral erscheint. Bei der Anionen-Chromatografie rührt die Austauscherfunktion im allgemeinen von einer quartären Ammoniumgruppe her, an die sich der basische Teil des Eluenten anlagert. Dieser wiederum wird von den negativ geladenen Ionen der Probelösung verdrängt. So können die verschiedenen Ionen in der Lösung aufgrund ihrer unterschiedlichen Affinität zur stationären Phase getrennt und beim nachfolgenden Durchgang durch einen entsprechenden Detektor anhand der Leitfähigkeitsänderung im Vergleich zum Ruhestrom registriert werden (Weiß und Göbl [92]).

Darstellung der Ergebnisse

Der Austauschvorgang auf der Säule und das daraus resultierende Ergebnis kann mit Hilfe eines Kompensationschreibers oder eines Bildschirms optisch veranschaulicht werden. Solche "Chromatogramme" genannten Aufzeichnungen zeigen, wie sich im Verlauf einer Analyse der zuvor auf Null abgegliche Detektorstrom bzw. die -spannung infolge variierender Leitfähigkeitswerte verändert.

Beim Registrieren dieses Vorganges erhält man aufgrund der Zeitabhängigkeit (Abszisse) der Spannungsänderungen des Detektors (Ordinate) im Regelfall symmetrisch ausgebildete Kurven nach Art einer Gaußverteilung (peaks). Bezieht man die Grundlinie ein, so läßt sich die Konzentration des entsprechenden chemischen Stoffs bzw. Ions planimetrieren. Der ihr proportionale Flächeninhalt ergibt sich aus der Formel für ein gleichschenkliges Dreieck: $F = H \cdot W$, wobei F die Fläche, H die Höhe und W die Halbwertsbreite des Dreiecks bedeuten. Im vorliegenden Fall erfolgen sämtliche Berechnungen mit Hilfe einer entsprechenden Software, so daß sich die Ergebnisse von einem Drucker abrufen lassen. Darstellungsprinzip und erreichbare Empfindlichkeit sind den Bildern 18 und 19 zu entnehmen.

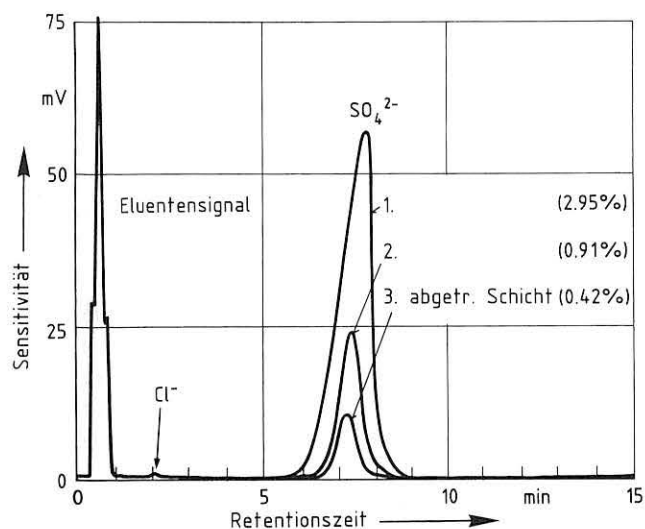


Bild 18: Übereinandergelegte Ionenchromatogramme einer Folge von drei Oberflächenschichten eines verwitterten Kalkputzes (Schema)

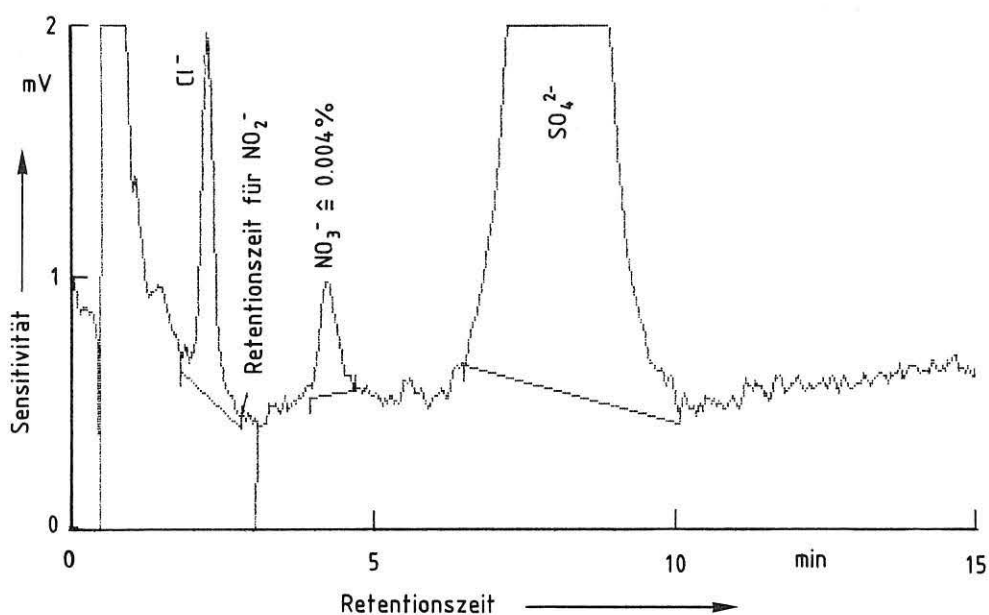


Bild 19: Chromatogramm eines verwitterten Kalkmörtels, das bei erhöhter Empfindlichkeit Spuren von Chlorid und Nitrat zeigt (Originaldiagramm)

5 Ergebnisse

Für die Untersuchung dienten in erster Linie eigens hergestellte und ausgelagerte Mörtel sowie Putze von Bauwerken. Wegen der inzwischen erheblichen Verringerung der Luftschadstoff-Konzentration im Berliner Raum und der dadurch notwendigen Verlängerung der Auslagerungszeit ergab sich allerdings eine Verschiebung des Arbeitsschwerpunktes in Richtung auf das Fassaden-Material. Denn die nach einem halben Jahr bzw. nach 1 1/2 Jahren von den Auslagerungsgestellen entnommenen Proben zeigten im Vergleich zum Ausgangszustand nur geringe Veränderungen des Chemismus. Erfreulicherweise ließen sich anhand von Mörtelplatten, die aus einem älteren Vorhaben zur Verfügung standen und über längere Zeit (17 Jahre) der Freibewitterung ausgesetzt waren, wichtige Hinweise auf deren Verhalten unter Schadstoffeinwirkung gewinnen. Ein weiterer Grund, das Augenmerk verstärkt auf Bauwerksproben zu richten, lag darin, daß - zunächst überraschend - eine Abhängigkeit sowohl von Expositionsrichtung wie auch Entnahmehöhe am Gebäude festgestellt werden konnte. Vorangestellt werden diesen Beobachtungen Ergebnisse von Untersuchungen zur Aufnahme von SO_2 an Proben, die an der Universität Hamburg im Auftrag durchgeführt worden sind (vgl. auch [93]).

5.1 Ermittlung der Depositionsgeschwindigkeit und der Aufnahme rate von SO_2 für Mörtel nach der Kammermethode

Eine im Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg entwickelte Methode erlaubt es, die Aufnahme von SO_2 durch einen Baustoff über einen bestimmten Zeitraum zu verfolgen und quantitativ zu erfassen. Zwar ist es auch möglich, an einer Fassadenprobe

den Sulfatgehalt und damit die äquivalente SO_2 -Menge zu ermitteln. Vorbedingung ist jedoch, daß das Bindemittel nicht schon von vornherein hohe Mengen an Verunreinigungen enthält. Da aber durch Witterungseinflüsse neugebildete Phasen wie Gips aufgelöst und an bestimmten Stellen angereichert werden können, ist der vorgefundene Sulfatgehalt nicht unbedingt repräsentativ für das tatsächlich aufgenommene SO_2 . Außerdem ist das Alter verputzter Fassaden selten genau genug bekannt. Man erhält auf diesem Wege kaum zuverlässige Daten für die SO_2 -Aufnahme pro Zeit- und Flächeneinheit. Das im folgenden beschriebene Verfahren schafft dagegen wenigstens für eine kurze Versuchszeit kontrollierte Randbedingungen.

Bei den Experimenten strömt in einer Reaktionskammer eine abgemessene Luftmenge mit bekanntem SO_2 -Gehalt über die Probe. Aus der SO_2 -Abnahme bestimmt man die Depositionsgeschwindigkeit V_d , bei Berücksichtigung der reaktiven Materialoberfläche auch die Aufnahme Φ , z.B. nach 20 h, als Rate Φ_{20} . Als SO_2 -Konzentration sind 150 ppb (= 405 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft) - entsprechend einer hohen, bei Smog auftretenden Belastung - und 37 ppb (= 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) gewählt worden, was eine mittlere Belastung in den Wintermonaten simulieren soll. Die Versuchsdurchführung erfolgte bei 20 - 22 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 - 60 % über einen Zeitraum von mehr als 20 Stunden. Als Probekörper dienten große Platten jener sechs verschiedenen auch zur Freibewitterung ausgelagerten Putzmörteltypen nach 90tägiger Vorlagerung bei 90 % r.F. und 20 °C sowie Baumberger "Sandstein". Die erforderlichen Berechnungen finden sich in der Dissertation von Wittenburg [93], der auch alle Untersuchungen dieser Art vorgenommen hat. In Bild 20 ist als Beispiel die Depositionsgeschwindigkeit V_d in cm/s sowie die SO_2 -Aufnahme Φ in mg/m^2 für einen Dolomitmörtel mit Zementzusatz gegen die Versuchszeit aufgetragen.

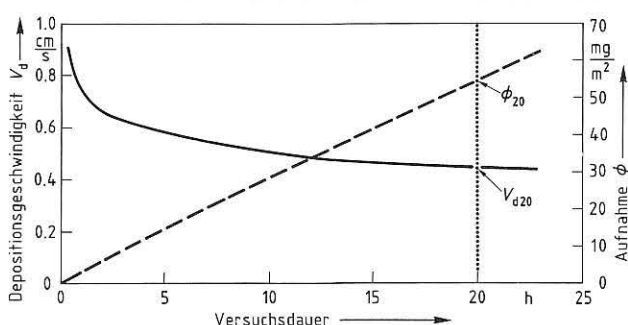


Bild 20: Zeitlicher Verlauf der SO_2 -Depositionsgeschwindigkeit und -Aufnahme für einen Dolomitmörtel mit Zementzusatz

Die Ergebnisse liefern eine Reihenfolge, die aus Tabelle 4 zu ersehen ist. Dabei ist deutlich zu erkennen, daß ein Zementzusatz sowohl die Depositionsgeschwindigkeit als auch die Aufnahme für SO_2 erhöht. Eine Erniedrigung der Konzentration auf 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ führt erwartungsgemäß zu einer größeren Geschwindigkeit der Deposition, dem-

Tabelle 4: Ermittelte SO_2 -Depositionsgeschwindigkeit V_d und Aufnahme Φ_{20} (nach 20 h) für unterschiedliche Mörtelproben (Gaskonzentration 405 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft)

Bindemittel	V_d in cm/s	Φ_{20} in mg/m^2
Dolomitmörtel mit Zementzusatz	1,71	74,8
Weißkalkhydrat mit Zementzusatz	0,54	59,5
Sumpfkalkhydrat	0,45	54,6
Baumberger "Sandstein"	0,40	51,0
Hydraulischer Kalk	0,20	32,1
Weißkalkhydrat	0,11	29,1
Dolomitmörtel	0,09	24,6

entsprechend aber zu einer kleineren Rate. In der Abfolge weist dann der Weißkalkmörtel die kleinsten Werte auf. Im trockenen Zustand erweisen sich reine Dolomitmörtel und Weißkalkmörtel als wenig empfindlich gegenüber SO_2 -Einwirkung, während ihre zementhaltigen Äquivalente eine mehr als doppelt so hohe Aufnahme zeigen. Sumpfkalkmörtel nimmt eine Mittelstellung ein. Möglicherweise übt die Dispersität des Bindemittels einen wesentlichen Einfluß auf dieses Verhalten aus. An den porenraumbezogenen Daten ist diese Reihung allerdings nur teilweise erkennbar. So liegen bei Rückstellproben, die in ihrem Zustand den hier verwendeten entsprechen, zwar die Werte für das spezifische Porenvolumen dicht beieinander, aber die Werte für R-Intervall und Mikroporosität sind bei den zwei zementhaltigen Putzen deutlich höher und für den Median vielfach kleiner als bei den Chargen ohne Zusatz. Vergleicht man die als Materialkennwerte zu bezeichnenden V_d - und Φ -Daten mit den entsprechenden für kalkgebundene Sandsteine (vgl. [83]), so fällt auf, daß im Falle der höheren Gaskonzentration keiner davon eine höhere Depositionsgeschwindigkeit oder auch Aufnahme erkennen läßt als die zementhaltigen Mörtel. Die Kalkmörtel liegen jedoch in der gleichen Größenordnung wie die dort aufgeführten Sandsteine. Der in den Untersuchungsumfang einbezogene Baumberger "Sandstein" - eigentlich ein sandhaltiger Kalkstein - ist dagegen als sehr reaktiv zu bezeichnen. Gleichartige Versuche, und zwar ebenfalls bei der hohen Gaskonzentration, wurden an Proben durchgeführt, die mit destilliertem Wasser zuvor durch kapillaren Aufstieg gesättigt worden waren (Tabelle 5).

Tabelle 5: Depositionsgeschwindigkeit V_d und Aufnahme Φ_{20} für SO_2 von wassergesättigten Putzmörteln

Bindemittel der Mörtel	V_d in cm/s	Φ_{20} in mg/m^2
Dolomitmörtel mit Zementzusatz	6,9	81,1
Weißkalkhydrat mit Zementzusatz	9,3	81,2
Sumpfkalkhydrat	5,1	79,8
Weißkalkhydrat	9,3	81,3
Dolomitmörtel	7,5	81,1

Erwartungsgemäß ist V_d bei nassen Proben erheblich größer als bei trockenem (vgl. *Tabelle 4*). Während die Aufnahme aller Mörtel nahezu gleich ist, zeigen sich geringe Unterschiede in der Geschwindigkeit der Gasabsorption, die auch deren Reihung beeinflussen. So weist unter diesen Bedingungen der Weißkalkmörtel die höchsten Werte auf. Zusammenfassend ist festzustellen, daß sich lediglich bei trockenem Proben Depositionsgeschwindigkeit bzw. Aufnahme für SO_2 als Materialkennwert erweisen, während durchfeuchtete Mörtel die zugegebene Gasmenge beinahe quantitativ absorbieren. Überträgt man die Aussage auf die Verhältnisse am Bauwerk, hängt es im wesentlichen von der Materialfeuchtigkeit ab, wie schnell und wieviel SO_2 aufgenommen wird. Mit anderen Worten: Die Expositionsbedingungen bestimmen das Verhalten des Putzmörtels gegenüber SO_2 , und die Extreme allein liefern eigentlich keine befriedigende Aussage.

5.2 Auslagerung von Mörtelproben über einen Zeitraum von 17 Jahren

Im Zuge eines früheren Vorhabens sind zwei Putzmörtelserien aus Weißkalk- bzw. Dolomitmalkhydrat mit unterschiedlichen Sand- und Zementanteilen hergestellt worden. Es handelte sich um Probekörper von 15 cm x 20 cm Fläche bei 1 cm Mörteldicke, die sich auf einer Basisplatte aus Faserzement befanden. Ein Teil dieser Proben war bis 1989 17 Jahre lang auf dem Dach des Hauses der Abteilung "Bauwerkssicherheit" der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in einem Auslagerungsgestell der Atmosphäre ausgesetzt. Parallelproben lagerten zur selben Zeit in einem Klimaraum bei 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte. An diesem Material wurden die physikalisch-technischen Eigenschaften und Merkmale sowie die che-

mische Zusammensetzung ermittelt. Für die Untersuchung mittels Quecksilber-Porosimetrie dienten ein Weißkalkmörtel und ein Dolomitmalkmörtel mit vergleichbaren Mischungsverhältnissen, deren Ergebnisse in Form von entsprechenden diskreten Werte der Porengrößenverteilung in *Tabelle 6* zusammengestellt worden sind. Betrachtet man die Veränderung der zur Atmosphäre weisenden oberen Mörtelschicht (0 - 5 mm Tiefe) im Vergleich zu der tiefer gelegenen (5 - 10 mm Tiefe), so fällt auf, daß bei den verwitterten und unverwitterten Proben sowohl das spezifische Porenvolumen, also das Volumen der Poren pro Gramm Substanz, wie auch die Mikroporosität und das von R a v a g l i o l i beschriebene Durchmesserintervall in Oberflächennähe größer sind, während der Median kleiner ist. Dies bedeutet, daß diese Schicht generell ein größeres Porenvolumen aufweist, die Porengröße aber insgesamt abnimmt. Ursache hierfür kann die Carbonatisierung während der Lagerung im Klimaraum oder im anderen Fall die Reaktion von Bindemittelbestandteilen z.B. mit atmosphärischem SO_2 sein. Was die jeweilige oberflächennahe Schicht der unterschiedlich exponierten Mörtel anbetrifft, sind folgende Veränderungen festzustellen: Kalkmörtel zeigen eine Zunahme des spezifischen Porenvolumens bei gleichzeitiger Verkleinerung von d_{10m} auf 53,1 μm und Verlagerung des Medians (von 2,0 auf 1,1 μm) zu feineren Poren hin. Dieser Effekt läßt Mineralneubildungen wie z.B. aus der Reaktion der Calciumkomponente des Bindemittels mit dem SO_2 der Atmosphäre vermuten. Beim Dolomitmalkmörtel liegen die Verhältnisse insofern etwas anders, als das spezifische Porenvolumen der im Freien exponierten einen geringeren Wert als die entsprechende im Klimaraum gelagerte Probe aufweist. Wahrscheinlich ist das auf Auslaugungsvorgänge im Oberflächenbereich [38] zurückzuführen, da das entstehende Magnesiumsulfat eine sehr hohe Löslichkeit besitzt.

Tabelle 6: Aus der Porengrößenverteilung von 17 Jahre lang gelagerten Luftkalkmörteln erhaltene Kennwerte und deren Veränderung aufgrund unterschiedlicher Expositionsbedingungen

Lage	Porenkennwert	Kalkmörtel		Dolomitmalkmörtel	
		bei 20 °C und 50 % r.F. gelagert	im Freien exponiert	bei 20 °C und 50 % r.F. gelagert	im Freien exponiert
Oberflächennahe Schicht (0-5 mm Tiefe)	spezif. Porenvolumen	0,146 cm ³ /g	0,157 cm ³ /g	0,159 cm ³ /g	0,144 cm ³ /g
	d_{10m}	1)	53,1 μm	2)	1)
	Ravaglioli-Intervall	20,2 %	19,0 %	13,8 %	13,1 %
	Mikroporosität	51,6 %	52,0 %	46,8 %	46,2 %
	Median (Radius)	2,0 μm	1,1 μm	3,6 μm	3,1 μm
Mörtelinneres (> 5 mm Tiefe)	spez. Porenvolumen	0,141 cm ³ /g	0,146 cm ³ /g	0,155 cm ³ /g	0,139 cm ³ /g
	d_{10m}	2)	1)	2)	2)
	Ravaglioli-Intervall	16,4 %	16,5 %	12,6 %	12,3 %
	Mikroporosität	45,0 %	49,2 %	45,6 %	45,0 %
	Median (Radius)	3,9 μm	2,7 μm	3,8 μm	3,5 μm

¹⁾ erreicht die Obergrenze des Erfassungsbereichs bei 75 μm Porendurchmesser

²⁾ überschreitet die Obergrenze des Erfassungsbereichs

Während ein Vergleich der Wasseraufnahmekoeffizienten w_0 in beiden Fällen keinen eindeutigen Trend erkennen läßt, was auch mit unzulänglichem Probematerial infolge schwieriger Präparation zusammenhängen könnte, registriert man bei den entsprechenden μ -Werten merkbare Unterschiede. Der Dampfdiffusionswiderstand ist bei den exponierten Proben im Durchschnitt um den Faktor 1,5 größer. Dies läßt sich ohne weiteres als Folge einer Verengung des offenen Porenraums - besonders des Anteils von groben Poren - durch Ablagerung von Verwitterungsprodukten interpretieren. Denn obwohl w_0 allein keine Aussage ermöglicht, zeichnet er in Verbindung mit μ eine Richtung vor. Das soll im folgenden Diagramm veranschaulicht werden (Bild 21), worin Meßpunkte für einzelne Serien des gleichen Mörteltyps sich jeweils durch Geraden miteinander verbinden lassen. So ist bei im Freien exponiertem Material die Erhöhung von w_0 stets mit einer Vergrößerung von μ verbunden.

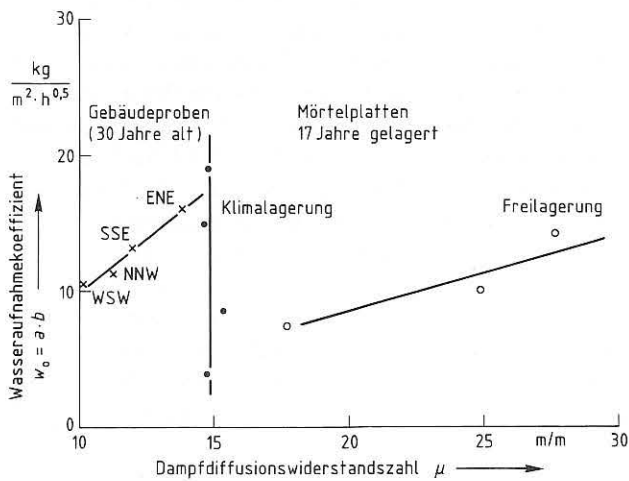


Bild 21: Beziehung zwischen Wasserdampfdiffusion und Kapillarverhalten: Gruppen von gleichartigen Putzmörteln, die sich jeweils durch ihre Lage im Diagramm unterscheiden

Durch coulometrische Titration wurde der Sulfat- und Carbonatgehalt von millimeterweise abgetragenen Schichten dieser Mörtel ermittelt. Bild 22 zeigt die entsprechenden Konzentrationsprofile für einen Kalk- und einen Dolomitmalkmörtel. Verglichen werden jeweils 17 Jahre im Klimaraum gelagerte Proben mit solchen, die gleichlang einer Industriatmosphäre ausgesetzt worden sind.

Interessant ist aber auch der zeitliche Verlauf von dessen Aufnahmeverhalten. In Bild 23 wird ein 4 Jahre lang ausgelagerter Mörtel mit einem von entsprechender Zusammensetzung verglichen, der 17 Jahre exponiert gewesen ist.

Würde man im vorliegenden Fall die Gehalte des ersten Millimeters der jeweiligen Mörtel gegen die Auslagerungszeit auftragen, ergäbe das einen nahezu exponentiellen Anstieg der Sulfataufnahme. Dies liegt aber daran, daß neben dem Nullpunkt nur zwei Werte zur Verfügung stehen, die sich willkürlich miteinander verbinden lassen. Zu erwarten ist, daß sich die Aufnahme mit zunehmender Dauer verringert, zumal ja in den letzten 20 Jahren der SO_2 -Anteil in der Außenluft merklich abgenommen hat.

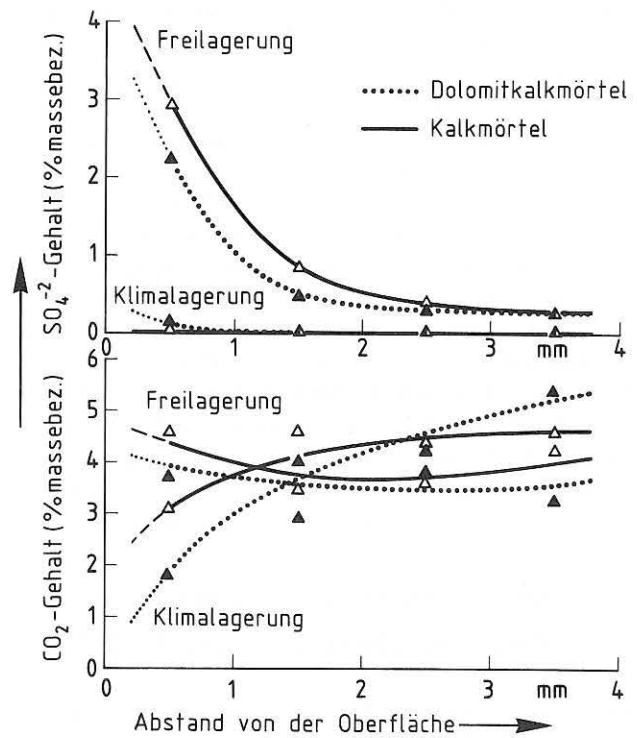


Bild 22: Vergleichende Tiefenprofile für Sulfat (oben) und Carbonat (unten) für verwitterte und unverwitterte Proben zweier Mörteltypen nach 17 Jahren Lagerung

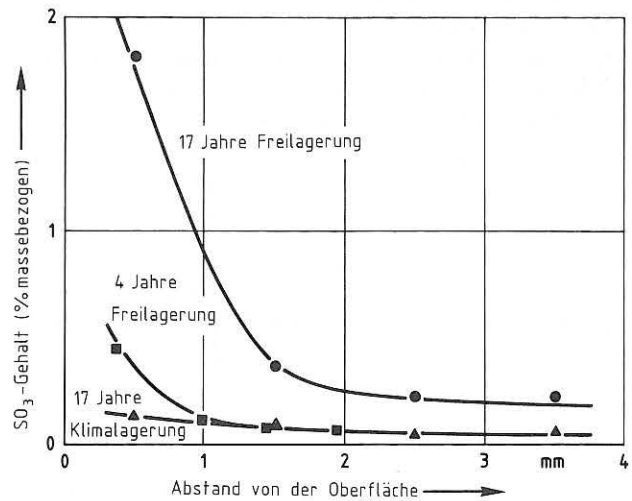
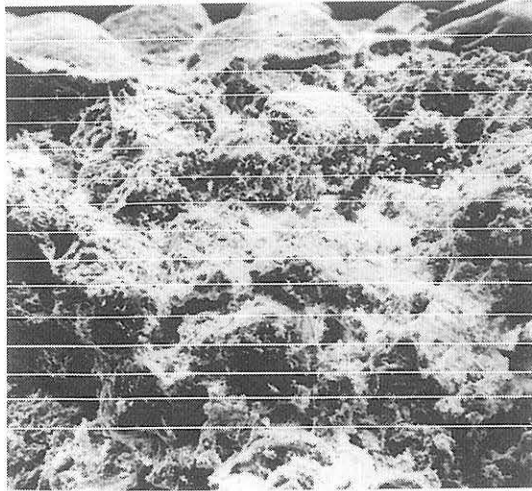


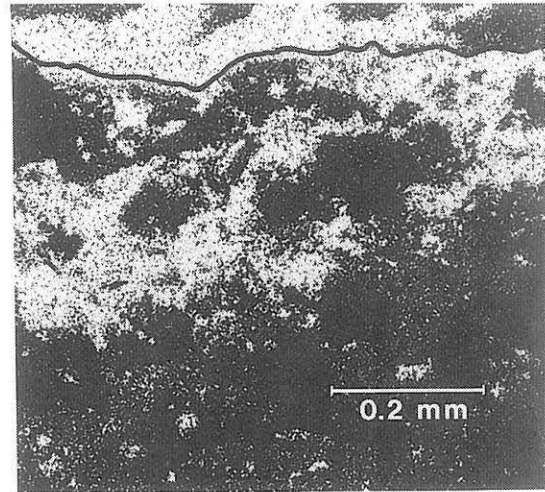
Bild 23: Sulfatanreicherung, ausgedrückt als SO_3 , in einem Dolomitmalkmörtel nach unterschiedlichen Lagerungszeiten

Auch zeigte das Material im Oberflächenbereich eine Anreicherung von Nitrat (bis zu 0,06 % massebezogen), obwohl die entsprechenden Ausgangsmaterialien frei davon waren. Nitrit ließ sich nicht nachweisen.

Eine andere Methode zur Ermittlung der Elementverteilung im submikroskopischen Bereich stellt die Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenanalyse dar. So kann man auch die Schwefelverteilung als repräsentativ für die durch Reaktion mit dem atmosphärischen SO_2 gebildeten Sulfate im Oberflächenbereich von Mörteln ansehen. Die Bruchfläche eines entsprechend lang exponierten Weißkalkmörtels ist im Sekundärelektronenbild sichtbar (Bild 24)



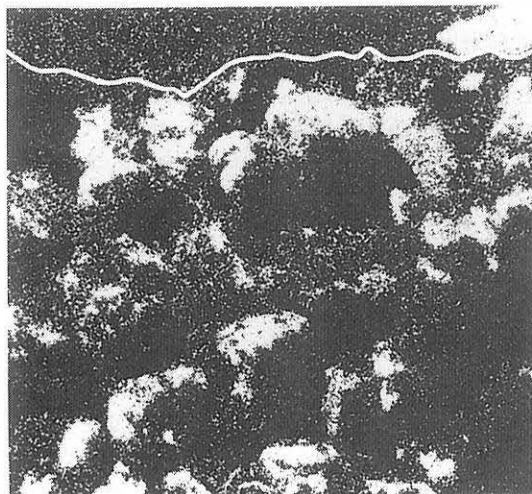
Sekundärelektronenbild



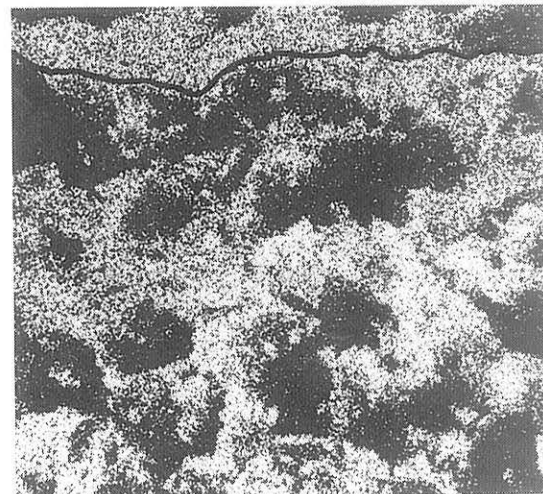
Proben-
ober-
kante

0.2 mm

S - Verteilung



Si-Verteilung



Ca-Verteilung

Bild 24: EDX-Analyse der Ca-, S- und Si-Verteilung in oberflächennahen Bereichen eines 17 Jahre lang der Atmosphäre ausgesetzten Weißkalkmörtels

Auf der Basis der Schwefel- und Calciumverteilung ist eine Anreicherung von Sulfat unmittelbar unterhalb der Oberfläche zu beobachten, während Calcium scheinbar rückläufig ist (ebenfalls in Bild 24 zu erkennen), was sich durch den pro Volumeneinheit geringeren Anteil desselben in Sulfaten gegenüber Carbonaten erklären läßt. Dunkle Flecke sind z.T. auf Abschattungseffekte zurückzuführen oder repräsentieren Quarzkörner (vgl. entsprechende Verteilung für Silicium).

Die parallel zur Oberfläche verlaufenden Linien im Sekundärelektronenbild sind entsprechenden Röntgenanalysen entlang derselben zuzuordnen. Die relativen Intensitäten für die beiden interessierenden Elemente sind in Bild 25 aufgetragen und zeigen einen erhöhten Schwefelanteil bis etwa 0,8 mm Abstand von der Oberfläche, während die Calciumverteilung gegenläufig ist. Im Vergleich dazu ist im unteren Teil dieses Bildes eine entsprechende Verteilung für ein im Klimaraum (20 °C/50° r.F.) gelagertes, unverwittertes Äquivalent dargestellt, in dem nur eine äußerst geringe Erhöhung des Schwefelanteils auftritt, Calcium aber deutlich höhere Intensitäten bis etwa 0,4 mm Profiltiefe zeigt, die auf den pro Formeleinheit höheren Anteil an Calcium in der Carbonat- gegenüber der Hydroxidphase zurückzuführen ist.

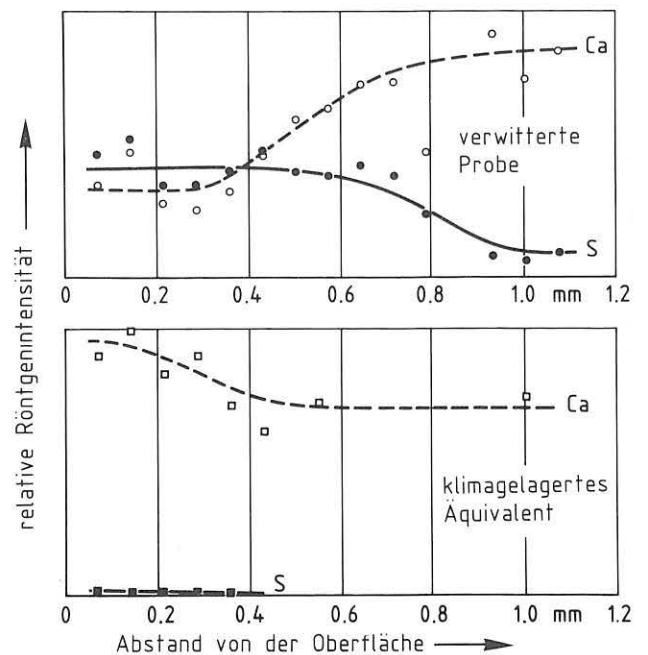


Bild 25: Vergleich der S- und Ca-Verteilung in einem 17 Jahre lang ausgelagerten Weißkalkmörtel und einem unverwitterten Äquivalent

Einige Erwartung wurde in die Unterschiede der spezifischen Oberfläche gesetzt, die u.a. ein Merkmal des Reaktionsstadiums zwischen Bindemittel und atmosphärischen Einflüssen darstellt. Dabei muß man sich jedoch klar darüber werden, daß dies letztlich nicht mehr sein kann als ein zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegendes summarisches Ergebnis von Carbonatisierung, Sulfatisierung und Materialgefüge. Mit zunehmendem Abstand von der Probenoberfläche verringert sich die spezifische Oberfläche bei im Freien exponierten Putzmörteln, während im Klimaraum (20 °C / 50 % r.F.), also in nahezu SO₂-freier Atmosphäre gelagerte Äquivalente den umgekehrten Effekt zeigen. Im ersten Fall verläuft die Abnahme nahezu parallel mit der des Sulfatgehalts, im zweiten Fall ist an der Oberfläche, wo der Carbonatisierungsgrad am größten ist, die spezifische Oberfläche am geringsten (Bild 26).

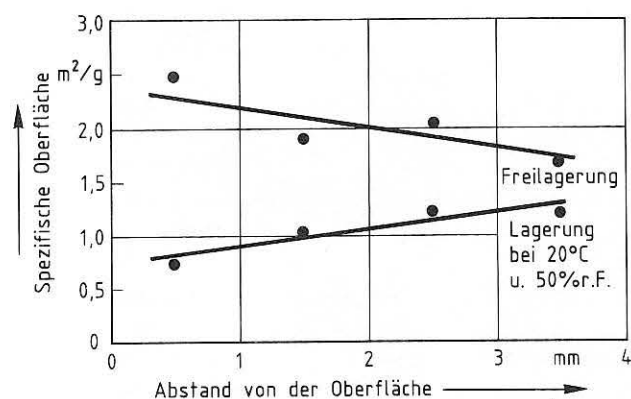


Bild 26: Spezifische Oberfläche eines Dolomitkalkmörtels mit einem Mischungsverhältnis von Bindemittel : Sand (in Volumenteilen) wie 1 : 2,7 und deren Veränderung mit zunehmendem Abstand von der Probenoberfläche aufgrund unterschiedlicher Expositionsbedingungen

Generell ist dieser Parameter für frei exponierte Proben zwei- bis dreimal größer als für entsprechende im Innenraum gelagerte, was daraufhin deutet, daß Carbonatisierung und Sulfatisierung Vorgänge sind, die zur gleichen Zeit stattfinden und sich gegenseitig überlappen. Auch wenn es sich bei der Bestimmungsmethode lediglich um das Ein-Punkt-Verfahren nach H a u l und D ü m b g e n [31] handelt und präparative Ungereimtheiten Fehler einbringen können, ist dieser Befund doch unstrittig.

In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, welchen Einfluß das Mischungsverhältnis auf das Mörtelgefüge ausübt und welche Folgen dies für das Verhalten am Bauwerk hat. Erste Ergebnisse von systematischen Untersuchungen an 4 Jahre altem, im Labor hergestelltem und anschließend bei 20 °C und 50 % r.F. gelagertem Material zeigen, daß bei Dolomitkalk- bzw. Kalkmörtel eine volumenbezogene Zugabe von nur 3,5 % Zement eine erhebliche Zunahme des Feinporenanteils mit sich bringt (Tabelle 7). Danach erhöht sich die Mikroporosität im ersten Fall von 40 auf etwa 60 % und im zweiten von 40 auf etwa 77 %. Je mehr Zement man zugibt, desto mehr verstärkt sich dieser Effekt. So gelangen immer mehr Poren in den Bereich kritischer, d.h. kleiner Durchmesser, wodurch das Material empfindlicher gegenüber Frostbeanspruchung wird. Dies gilt natürlich nur unter der Annahme, daß der dafür herangezogene Kennwert auch auf diese Art Material zu übertragen ist. Erhöht man den Bindemittelanteil, stellt sich der gleiche Effekt ein. So führt bei einem Dolomitkalkmörtel die Veränderung des Bindemittel / Sand-Verhältnisses von 1 : 4,5 in Raumteilen auf 1 : 2,7 zu einer Vergrößerung der Mikroporosität von 40 auf 60 %. Im Hinblick auf die Sulfataufnahme, zeigen magere Mörtel mit ihrem größeren Anteil an Grobporen einen höheren Gehalt in der äußersten 1 mm dicken Oberflächenschicht als fettere.

Tabelle 7: Kennwerte von 4 Jahre klimagelagerten Putzmörteln mit unterschiedlichem Mischungsverhältnis, ermittelt anhand ihrer Porengrößenverteilung

Porenkennwert	Dolomitkalkmörtel				Weißkalkmörtel	
	1 : 4,5 ¹⁾	1 : 2,7 ¹⁾	1 : 0,2 : 4,5 ²⁾	1 : 0,5 : 6,5 ²⁾	1 : 4,5 ³⁾	1 : 0,2 : 4,5 ⁴⁾
d _{10,m} in µm	5 ⁵⁾	35,0	40,0	26,0	5 ⁵⁾	17,2
Ravaglioli-Intervall in %	22,5	29,5	27,5	26,3	23,5	36,5
Mikroporosität in %	40,0	61,5	62,5	72,5	42,0	77,0
Median (Radius) in µm	9,0	1,0	1,0	0,9	4,7	0,8

¹⁾ Verhältnis der Bestandteile von Dolomitkalkhydrat und Sand als Volumenverhältnis

²⁾ Verhältnis von Dolomitkalkhydrat, Zement und Sand

³⁾ Verhältnis von Weißkalkhydrat und Sand

⁴⁾ Verhältnis von Weißkalkhydrat, Zement und Sand

⁵⁾ überschreitet die Obergrenze des Erfassungsbereichs

Trotz des höheren Absorptionsvermögens des Bindemittels im letzteren Fall, scheint der erhöhte Feinporenanteil hierfür ausschlaggebend zu sein. Ähnlich verhalten sich Mörtel mit Zementzusatz. In dem Maße, wie der Feinporenanteil bei nahezu unverändertem Porenvolumen zunimmt, verringert sich die Aufnahme und die Eindringtiefe von Sulfat. Dieser Trend läßt sich sowohl bei den 4 wie auch 17 Jahre lang ausgelagerten Putzproben beobachten.

5.3 Richtungsabhängige Veränderungen von Putzmörteln als Folge unterschiedlicher Expositionsbedingungen am Bauwerk

Nicht gerade einfach ist es schon, die Ursachen der Verteilung der löslichen Bestandteile innerhalb des Porensystems zu klären. Wesentlich schwieriger gestaltet sich der Nachweis ihres Einflusses auf die Gefügemerkmale des Baustoffs. Mitunter sind die durch lokale Reaktionen und Anreicherungen bewirkten, versuchstechnisch erfassbaren Veränderungen an den Grenzen zwischen Zuschlagkorn und Bindemittelagglomerat so wenig signifikant, daß sie sogar von der Meßwertstreuung überlagert werden. Nur ausreichendes Datenmaterial kann hier Abhilfe schaffen. Das überwiegend aus offenen und durchströmbaren Hohlräumen zusammengesetzte Porensystem stellt letztlich das Negativ zwischen den verschieden großen Zuschlagkörnern und den örtlichen Bindemittelanreicherungen dar. Als Folge der Erhärtung bilden beide zusammen eine Art

Gerüst, das der Putzschale - mit einem Gefälle senkrecht zur Oberfläche - jene mechanische Festigkeit verleiht, die sie überhaupt erst für den Schutz des Bauwerks gegen Niederschläge geeignet macht.

Von einem freistehenden dreistöckigen Wohnhaus in unmittelbarer Nähe der Bundesanstalt wurden an den vier Gebäudeseiten jeweils charakteristische Proben für die Quecksilber- Porosimetrie entnommen. Der Außenwandputz bestand überall aus Kalkmörtel mit Zementzusatz in vergleichbarem Mischungsverhältnis. Von den in annähernd gleicher Höhe gesammelten Proben wurden dann schichtenweise die oberen 5 mm und der darunter befindliche Teil gewonnen. Rauigkeit und unregelmäßiges Erscheinungsbild des Oberputzes führten sowohl zu präparativen Schwierigkeiten wie auch zu etwas unterschiedlichem Einfluß auf die Resultate. Die ermittelten Daten bzw. die daraus errechneten Werte werden in *Tabelle 8* angegeben. Läßt man d_{10m} einmal beiseite, dessen Beträge in der Regel zu sehr an der Außengrenze des Erfassungsbereichs der Methode liegen, so ist eine tendenzielle Veränderung der diskreten Werte von einer abgetragenen Schicht zur anderen zu erkennen, die von der Himmelsrichtung abhängt. Dabei erhöhen sich spezifisches Porenvolumen, Ravaglioli-Intervall und Mikroporosität systematisch mit der Tiefe, während sich der Median umgekehrt verhält. Dies bedeutet abnehmende Porosität und gegenüber dem Mörtelinneren ein Vorherrschen größerer Poren in der Außenschicht. Als naheliegende Erklärung hierfür läßt sich das Verstopfen der feinen Poren durch neugebildete Mineralphasen aus der Reaktion oder Umkristallisation heranziehen.

Tabelle 8: Kennwerte der Porengrößenverteilung ermittelt an einem ungefähr 30 Jahre alten Putzmörtel und ihre Veränderung infolge unterschiedlicher Expositionsbedingungen in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung

Entnahmeort:	Fassade (Rauhputz mit unregelmäßiger Oberfläche)								Giebel (Glattputz)			
	ENE		SSE		WSW		NNW		SSE		NNW	
Orientierung:												
Höhe am Bauwerk in m:	4 - 6		6 - 8		6 - 8		6 - 8		8 - 12		8 - 12	
Tiefe in mm:	0 - 5	>5	0 - 5	>5	0 - 5	>5	0 - 5	>5	0 - 5	>5	0 - 5	>5
	spezifisches Porenvolumen in cm^3/g	0,160	0,163	0,130	0,176	0,168	0,197	0,162	0,171	0,175	0,161	0,186
d_{10m} in μm	1)	62,0	1)	52,5	1)	68,3	1)	70,0	1)	1)	37,5	1)
Ravaglioli-Intervall in %	14,6	29,7	20,2	30,0	14,6	18,6	15,7	22,1	20,2	23,0	23,8	16,4
Mikroporosität in %	49,0	68,5	61,9	75,0	53,2	67,9	53,2	59,8	58,4	62,7	75,0	66,0
Median (Radius) in μm	2,7	0,63	0,57	0,54	1,1	0,52	1,6	0,82	1,0	0,85	0,43	0,65

¹⁾ erreicht oder überschreitet die Obergrenze des Erfassungsbereichs bei 75,0 μm Porendurchmesser

Einflüsse der jeweiligen Himmelsrichtung kommen sehr wahrscheinlich durch Differenzen zwischen bzw. in der Höhe der entsprechenden Werte zum Ausdruck. Da die Konzentrationsprofile beweisen, daß der eigentliche Verwitterungsvorgang lediglich in den oberen 4 bis 5 Millimetern stattfindet, verdient ein Vergleich der Oberflächenschichten besondere Aufmerksamkeit. Hierbei unterscheiden sich die Gefügedaten der SSE-Fassade auffällig von denen der anderen Seiten. Neben dem Auffüllen des Porenraums mit Reaktionsprodukten spielen hierbei möglicherweise die Orientierung gegenüber der vielbefahrenen Verkehrsstraße "Unter den Eichen", gleichermaßen aber Sonnenlicht sowie Temperaturunterschiede und Taubildung eine wesentliche Rolle (vgl. Bild 27).

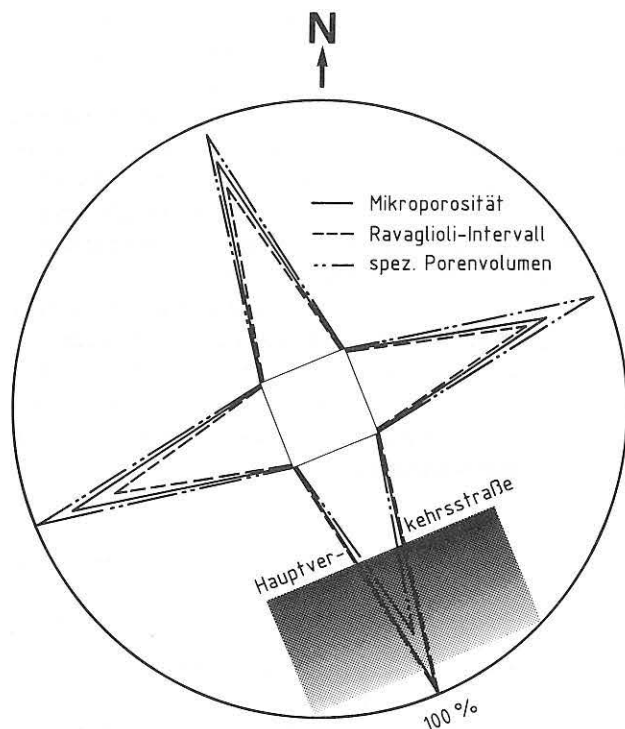


Bild 27: Porengrößenverteilung in Außenputzmörteln: diskrete Werte, deren Maxima gleich 100 % gesetzt worden sind, dargestellt für die Fassaden eines Wohnhauses

Zufriedenstellend charakterisieren kann man den verfügbaren Porenraum darüber hinaus auch durch den Wasseraufnahmekoeffizienten $w_0 = a \cdot b$ oder die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ . Berücksichtigt man die Heterogenität sowie den unregelmäßigen Probenquerschnitt, welche die kapillare Flüssigkeitsaufnahme der betreffenden Materialprobe bestimmen, so erfaßt die erhaltene Anpassungsfunktion doch einige Parameter mit hinreichender Genauigkeit. Obwohl man die Meßprobleme für Putzmörtel praktisch beherrscht, ergeben sich doch Schwierigkeiten bei der Formgebung des spröden und bröckeligen Materials zu Probekörpern mit einigermaßen rechtwinkligen Umrissen. Man erhält letztlich integrierende Mittelwerte des Saugverhaltens, obwohl das Material, seiner Herstellung wegen mitunter mehrschichtig ist. Wenn gleich sich an den Mörtelproben also nur eine Messung der Kapillarität über den Gesamtquerschnitt entsprechend

deren Saugfläche durchführen läßt und nach der verhältnismäßig kurzen Zeitspanne von etwa einem halben bis zu einem Tag die Kurvenstabilität noch nicht hinreichend gewährleistet ist, kann man doch Aufschluß über den als Materialkennwert bedeutsamen Wasseraufnahmekoeffizienten erhalten. Dieser gibt Einblick in die Dynamik des von außen eindringenden Regenwassers, die innerhalb des Putzprofils eine von den treibenden Kräften für die Neuverteilung der vagabundierenden Salze darstellt. Bei automatischer Registrierung der Wägewerte werden auf diesem Wege glaubwürdige Kurvenzüge erhalten.

Aus Proben vom erwähnten Gebäude wurden kreisrunde Scheiben von ca. 10 cm Durchmesser und gleichmäßiger Dicke zwecks Ermittlung der Wasserdampfdiffusion herausgearbeitet und im Versuchsklima (20 °C/50 % r.F.) über einige Tage den bestehenden Temperatur/Feuchte-Verhältnissen angepaßt. Der geringe Widerstand des Mörtels gegen Verformung infolge Temperaturwechselbeanspruchung läßt sich nicht zuletzt durch seine offene Struktur erklären, die mit einer verhältnismäßig hohen Porosität einhergeht. Diese fördert auch eine hohe Durchströmbarkeit für Fluide, bringt auf diesem Wege die Reaktionspartner einander näher und begünstigt damit gleichzeitig die Umlagerung der Reaktionsprodukte. Sowohl der Wasseraufnahmekoeffizient w_0 wie auch die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ ist in Proben aus der ENE (Ostnordost)-Fassade am höchsten, fällt über die SSE (Südsüdost)- und NNW-Fassaden ab und erreicht schließlich auf der nach WSW weisenden Gebäudeseite ihren niedrigsten Wert. Trägt man beide Kennwerte gegeneinander auf, so ergibt sich eine lineare Abhängigkeit (vgl. Bild 21). Was die übrigen Kennwerte anbetrifft, unterscheidet sich diese Fassade nur unwesentlich von den anderen.

Weiterhin war auch die chemische Zusammensetzung solcher Putzmörtel von Interesse, da sie die nach Art eines Schnappschusses den aktuellen Zustand des Hauses beschreibt. Da diese von in verschiedene Himmelsrichtungen weisenden Seiten des Gebäudes stammen und auch in ihrem Chemismus etwas variieren, ist zunächst nicht mit einer systematischen Abfolge der Eigenschaften zu rechnen gewesen. Ihr wesentliches gemeinsames Merkmal besteht in der gleichen Standzeit, die über 30 Jahre beträgt. Grundsätzlich sollte beachtet werden, daß man bei der Herstellung von Kratzputz üblicherweise Kieskörner von etwa 2 - 5 mm Durchmesser in die Rohmischung des Oberputzes einbringt, die dann die beabsichtigte dekorative Wirkung hervorrufen. Diese Beimengung, die gelegentlich bis zu 20 % des Volumens ausmacht, ist durch Sieben vor Beginn der chemischen Analyse zu entfernen, um die Vergleichbarkeit der Hauptmasse des Bindemittels z.B. mit dem ebenfalls hier verbauten Glattputz zu gewährleisten. In Tabelle 9 sind für den von den vier Gebäudeseiten in vergleichbarer Höhe entnommenen Oberputzmörtel die Mischungsverhältnisse dargestellt. Wird dabei der Sulfatgehalt um den Anteil reduziert, der durch Reaktion mit atmosphärischem SO_2 ins Bindemittel gelangt ist, so kann man in allen Fällen auf einen Kalkmörtel mit Zementzusatz schließen.

Oberputzmörtel	M = Masseanteile R = Raunteile		Mischungsverhältnis		
			Kalk	Zement	Sand
ENE-Fassade	M		1,0	0,2	9,7
	R		2,0	0,2	7,4
SSE-Fassade	M		1,0	0,6	12,6
	R		2,0	0,5	9,7
WSW-Fassade	M		1,0	0,6	11,2
	R		2,0	0,5	8,6
NNW-Fassade	M		1,0	0,6	12,4
	R		2,0	0,5	9,6

Tabelle 9: Zusammensetzung von Proben eines ungefähr 30 Jahre alten, von allen vier Gebäudeseiten entnommenen Außenwandputzmörtels

Die chemische Analyse der abgetragenen Schichten zeigte in allen Fällen eine Abnahme des Sulfatanteils mit zunehmendem Abstand von der Probenoberfläche, wobei in dem äußersten Millimeter des Kratzputzes der ENE- und der SSE-Fassade die höchsten Gehalte von mehr als 2 % (bezogen auf die Trockenmasse), dagegen im entsprechenden Material der NNW-Seite die niedrigsten Anteile auftraten, was möglicherweise auf partielle Auslaugung durch Regenwasser zurückzuführen ist (Bild 28).

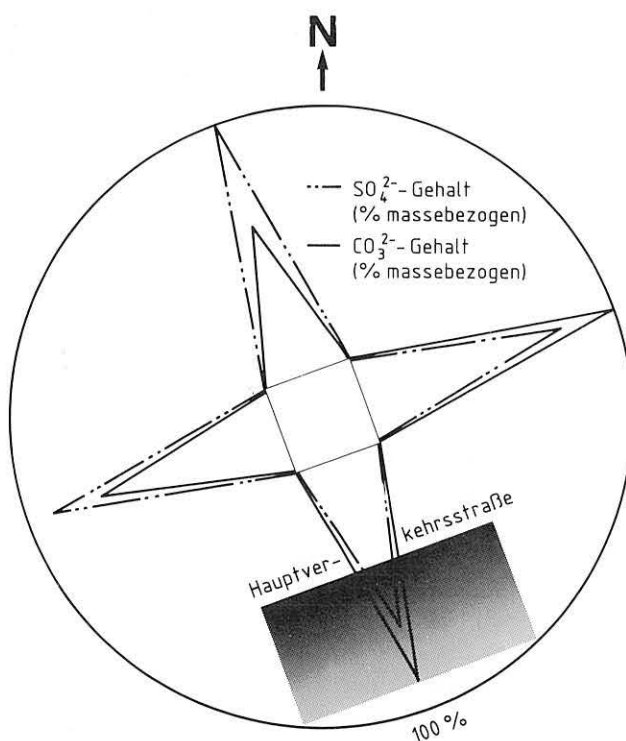
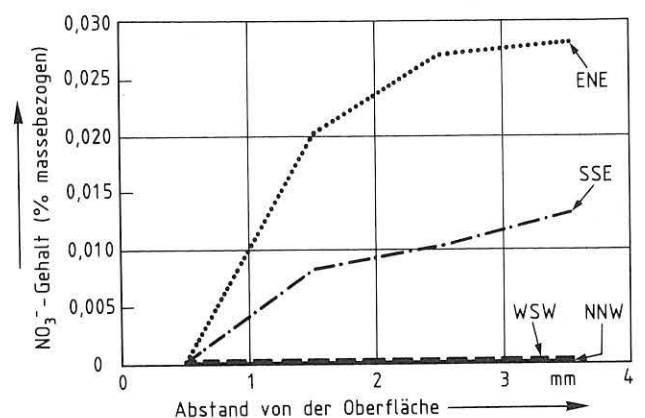


Bild 28: Konzentrationen von Sulfat und Carbonat in Außenwandputz: Gehalte, deren Maxima gleich 100 % gesetzt worden sind, dargestellt für die Fassaden eines Gebäudes

Bild 29: Vergleichendes Tiefenprofil, das die Nitratverteilung in einem ungefähr 30 Jahre alten Außenwandputzmörtel zeigt, wofür Proben von allen Seiten eines Wohngebäudes in gleicher Höhe entnommen worden sind.

Nicht anders als erwartet, erniedrigt sich mit zunehmender Profiltiefe auch der Calciumanteil im wässrigen Auszug, was mit der höheren Löslichkeit von Gips im Vergleich zu Calcit zusammenhängt. So ist in den Profilen jeweils ein Parallellauf von Calcium und Sulfat anzutreffen.

Nitrat lag nur in Spuren von 0,03 % bis kleiner als 0,01 % vor, wogegen es nicht in allen äußeren Schichten der Profile gefunden werden konnte. Lediglich in den gekratzten Oberflächen der ENE- und SSE-Fassade war es festzustellen (Bild 29). Die Ursache dafür ist wahrscheinlich in der Lage dieses Gebäudeteils in Richtung auf eine der meistbefahrenen Straßen Berlins zu suchen. So enthält auch nur eine der beiden Glatzputzflächen des Gebäudes, nämlich die nach SSE weisende, erwartungsgemäß geringe Nitratmengen. Nitrit ließ sich nicht nachweisen. Chloridkonzentrationen zwischen 0,02 % und kleiner 0,01 % konnten ebenfalls ermittelt werden, jedoch erwies sich ihre Verteilung nicht so systematisch wie die der anderen Anionen. In manchen Fällen schien hier zwischen der Quelle der Luftverunreinigungen und der Fassadenausrichtung nach SSE und ENE eine direkte Beziehung zu bestehen. Der pH-Wert der wässrigen Extrakte lag immer oberhalb vom Neutralpunkt mit einem Höchstwert bei 10,9. Mit abnehmendem Sulfatgehalt - entsprechend zunehmender Tiefenlage - stieg er dabei an, wobei auch hier die tiefer gelegenen Schichten aus der SSE- und ENE-Seite die höchsten Gehalte aufwiesen. Dies findet möglicherweise



durch intensivere Carbonatisierung bzw. Sulfatisierung eine plausible Erklärung. Beobachtungen zeigten übrigens, daß in den Auszügen freigelagerter Putzmörtel niedrigere pH-Werte als in ihren bei Raumklima aufbewahrten Äquivalenten vorlagen.

Nicht weiter bemerkenswert ist der schon anfangs erwähnte steile Abfall des Sulfatgehalts innerhalb der ersten Millimeter der Tiefenprofile von Material mit einer Kalkkomponente. Auch ist keineswegs auffällig, daß dessen Absolutwerte mit der Himmelsrichtung unterschiedlich sein können (vgl. Bilder 28 und 30).

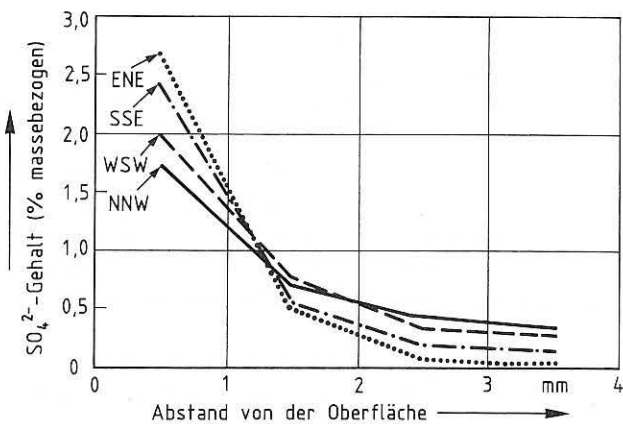


Bild 30: Sulfatverteilung in einem ungefähr 30 Jahre alten Außenwandputz, von dem Proben auf allen Seiten des Gebäudes entnommen worden sind

Was es bei einer solchen Darstellung zu berücksichtigen gilt, ist eine offenbar systematische Änderung der Reihenfolge in den Gehalten über die Gesamtprofile. Daß also niedrige Werte im Abtrag des 1. Millimeters mit relativ erhöhten beim 4. Millimeter Hand in Hand gehen, sowie umgekehrt hohe Sulfatgehalte an der Oberfläche mit niedrigen in der Tiefe, stimmt schon nachdenklich! Wird nämlich das arithmetische Mittel der zu jedem Profil gehörigen vier Gehalte gebildet, so liegt dieses einheitlich bei nahezu 0,8 % massebezogen. Setzt man vergleichbares Material an allen Gebäudeseiten sowie eine genügende Feuchtigkeitszufuhr für einen Lösungs-transport voraus, braucht zur Erklärung für jenes gegenseitige Überschneiden der einzelnen Konzentrationskurven keineswegs eine einseitige Immission als Ursache herangezogen werden, wie sie durch Lage des Gebäudes zu deren Quelle bedingt wäre. Vielmehr drängt sich die Vermutung auf, daß - ausgehend von einer anfänglich fast homogenen Verteilung in den ersten vier Millimetern des Profils - mit der Zeit durch mehr oder weniger intensive Verdunstung dieses Salz nachträglich angereichert worden ist. Sofern sich ein solcher Befund anhand von mehr Analysendaten auch an anderen allseitig bemusterten Gebäude bestätigen läßt, müßte man allerdings von einer unterdessen lieb gewordenen Vorstellung Abschied nehmen. Dies hieße wenigstens im Falle des Sulfats, daß man die gesamte geputzte Bauwerks-oberfläche

ein und derselben Höhenlage praktisch als einheitliche Reaktionsfront zu verstehen hätte, an der jedoch - abhängig vom Mikroklima - die Entstehung eines unterschiedlichen Konzentrationsgefälles erst nachträglich infolge Zyklen von Auflösung, Transport und Wiederausscheidung stattfinden würde.

Die Chemie erlaubt, da pulverförmiges Material bzw. wäßrige Auszüge davon benötigt werden, die Ermittlung von in Millimetern abgestuften Konzentrationsprofilen für die verschiedenen Luftverunreinigungen. Gefügeveränderungen lassen sich, da für die Hg- Porosimetrie eine bestimmte Menge von Bruchstücken zur Verfügung stehen muß, die auch nur mühsam aus dem bröckeligen Material gewonnen werden können, aber leider nur integral im Bereich zwischen 0 - 5 mm Abstand von der Probenoberfläche bzw. > 5 mm erfassen. Das Verschleißverhalten eines Materials gibt aber indirekt Auskunft hierüber. Es zeigt erwartungsgemäß ebenfalls große Unterschiede, was die Expositionsrichtung anbelangt (Bild 31).

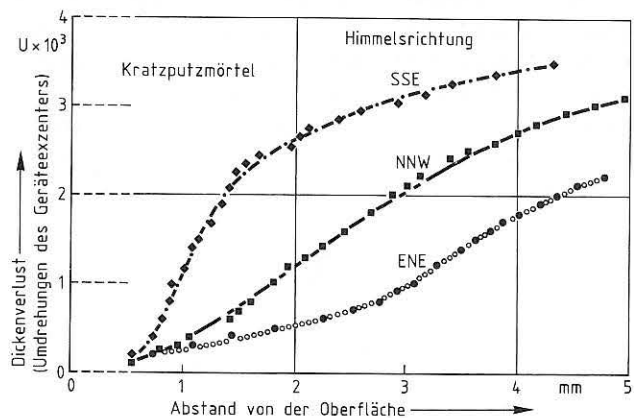


Bild 31: Verschleißverhalten von Außenwandputz in Abhängigkeit von der jeweiligen Himmelsrichtung

Deutlich sichtbar ist eine ausgeprägte Verhärtung in der als Rauhputz ausgeführten Schicht (gekratzte Oberfläche) bis in etwa 2 cm Tiefe an der SSE-Fassade, die an der NNW-Seite nur noch in geringem Umfang und an der ENE-Seite überhaupt nicht mehr auftritt. D.h. es liegt bei letzterem sowohl an der Oberfläche wie auch in 3 - 5 mm Tiefe eine vergleichbare Festigkeit vor, was einem nahezu linearen Anstieg der Summenkurve entspricht. Dieses Verhalten läßt sich gleichfalls aus dem Gefüge ableiten. Die SSE-Seite weist den höchsten Anteil an Feinporen, jedoch gleichzeitig das geringste Porenvolumen auf, während sich an der ENE-Seite die Verhältnisse umkehren (hohes spezifisches Porenvolumen, geringer Anteil an Mikroporen). Dabei scheint der Einfluß von Carbonatisierung bzw. auf deren Kosten stattfindender Sulfatisierung nicht so bedeutend zu sein. Der am Gebäude im Giebelbereich vorliegende Glattputz (geriebene Oberfläche) zeigt demgegenüber bis in etwa 2 mm Tiefe an SSE- und NNW-Fassade ein vergleichbares Verschleißverhalten (Bild 32).

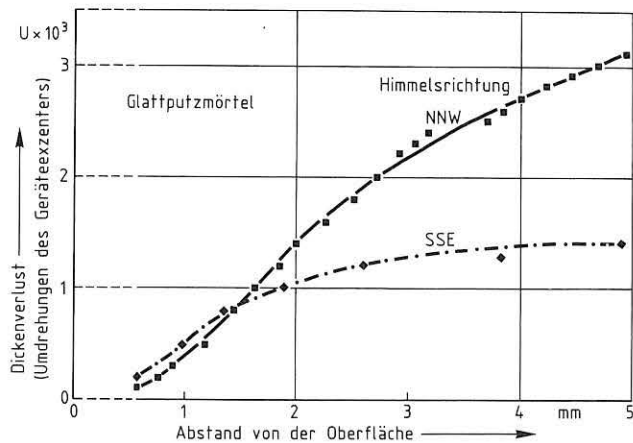


Bild 32: Verschleißverhalten von Außenwandputzmörtel, abhängig von der Himmelsrichtung

In größerem Abstand von der Oberfläche ist der Mörtel der NNW-Seite fester, was sich auch in dem höheren Anteil an Feinporen sowie der Verlagerung des Medians zu kleineren Porenradien hin gegenüber dem Material der entgegengesetzten Expositionsrichtung widerspiegelt (vgl. Tabelle 8). Generell sind jedoch Unterschiede zwischen Glatt- und Rauputzen festzustellen, sowohl im Hinblick auf das Gefüge wie auch auf die anderen Daten, was deutlich durch Verschleißverhalten und Sulfataufnahme zum Ausdruck kommt. Verantwortlich dafür ist die bei dieser Putzweise immer anzutreffende bindemittelreichere Oberflächenschicht, die zwangsläufig durch das Verreiben erhalten wird. Obwohl im vorliegenden Fall weitgehend entfernt, hat sie doch möglicherweise eine Art Schutzfunktion für das darunter befindliche Material ausgeübt und einer Verfestigung durch Carbonatisierung, Sulfatisierung oder Umkristallisation entgegenwirkt. Man kann also feststellen: Die Intensität der Verwitterung von Außenwandputz bei Einwirkung von SO_2 wird nicht von der Ausrichtung zur Schadstoffquelle, sondern durch die mikroklimatischen Verhältnisse am Expositionsort bestimmt. Dies steht in Übereinstimmung mit Ergebnissen, die an Kalkstein in Caen gewonnen worden sind, wo Sulfat von Verkehr und Industrie und Chloride vom nahen Atlantik vergleichbare Schäden hervorgerufen haben, die sich häufig in einer Veränderung von Gradienten bestimmter porenbezogener Kennwerte äußern [84].

Es ist hervorzuheben, daß unter den gewählten Versuchsbedingungen nur die wasserlöslichen Bestandteile erfaßt werden und nicht etwa jene, die bereits durch Abscheidung fixiert sind oder zu einem früheren Zeitpunkt zur Profilentstehung beigetragen haben. Obwohl diese Momentaufnahme einer lang andauernden Entwicklung mit dem scheinbaren Nachteil behaftet ist, daß man damit zurückliegende Stadien nicht mehr verfolgen kann, so gewährt sie doch Auskunft über das heutige Materialverhalten hinsichtlich Absorption und Lösungstransport. Die vorhergehenden unlöslichen Ablagerungen oder Umwandlungen, die sich jedoch eher durch eine summarische Wirkung auszeichnen, können dann in einem Säureaufschluß oder besser unmittelbar im Rasterelektronenmikroskop kombiniert mit einem energiedispersiven Röntgenanalysator untersucht werden.

5.4 Höhenabhängige Veränderungen von Putzmörteln am Bauwerk

Bei der Bemusterung des betreffenden Bauwerks hat man darauf geachtet, die Putzproben aus Bereichen zu nehmen, die möglichst senkrecht übereinander liegen. Zur Gefügekennzeichnung dienen die schon zuvor beschriebenen diskreten Werte der Porengrößenverteilung sowie der Wasseraufnahmekoeffizient w_0 und die Dampfdiffusionswiderstandszahl μ . Trägt man von den Proben der Westfassade dieses Mietshauses den Wasseraufnahmekoeffizienten gegen deren Entnahmehöhe auf, so erfährt dieser mit größerem Abstand vom Erdniveau eine merkliche Steigerung (Bild 33), was als Hinweis auf eine stärkere Verwitterung im Bereich der oberen Gebäudeteile zu werten ist.

Folgerichtig läßt sich so ein Anstieg von w_0 um den Faktor 4 bis 6 beobachten. Auch aus den Ergebnissen der Hg-Porosimetrie läßt sich der Einfluß der Expositionshöhe auf das Gefüge erkennen (Bild 34). Man sieht, daß mit der Höhe das spezifische Porenvolumen sowie der Wasseraufnahmekoeffizient größer werden, während Mikroporosität, R-Intervall und d_{10m} , aber auch der μ -Wert abfallen. Daraus kann man schließen, daß die Witterungseinflüsse zuerst eine Verkleinerung der groben Poren bewirken, z.B. durch Auffüllen mit Umlagerungs- bzw. Reaktionsprodukten, was eine Verschiebung von d_{10m} zu kleineren Durchmessern hin zur Folge hat, während sich das Spektrum im Feinporenbereich zu größeren Poren hin verlagert, was gleichzeitig mit einer Erhöhung des spezifischen Porenvolumens und der Dampfdurchlässigkeit verbunden ist.

Eine solche Aussage läßt sich sogar noch erweitern. Untersucht man nämlich Proben aus den oberen 0 - 5 mm getrennt von denen aus darunter befindlichen Lagen (5 - 10 mm Tiefe), so zeigt sich in der Verringerung der d_{10m} -Werte deutlich folgendes: Von der Oberfläche ausgehend werden mit zunehmender Höhe immer tiefer liegende Mörtelteile von der Verwitterung erfaßt, bis diese sich in 12 - 16 m über den gesamten Querschnitt einander angeglichen haben (Tabelle 10). Ein ähnliches Verhalten zeigt das spezifische Porenvolumen. Die übrigen Porenparameter unterliegen ebenfalls systematischen Veränderungen. So verringert sich zwar der Mikroporenanteil der gesamten Putzschale, die Differenzen zwischen den einzelnen Bereichen (0 - 5 mm / > 5 mm) bleiben aber nahezu konstant. All das führt zu einem steileren Verlauf der Porengrößenverteilung, d.h. einer Verkleinerung des Porenspektrums bei gleichzeitigem Herausbilden eines bevorzugten Durchmessers. Von Belang sind dabei Poren zwischen etwa 2 und 100 μm (Maximum zwischen etwa 5 und 10 μm).

Kapillaritätseffekte treten etwa zwischen 0,1 und 100 μm auf (vgl. L u t z et al. [55]), von den höhenabhängigen Veränderungen ist demnach besonders dieser, für den Flüssigkeitsaufstieg verantwortliche Porenbereich betroffen.

Kurve 1 mit $w_0 = 37,5$
 Kurve 2 mit $w_0 = 29,5$
 Entnahmehöhe: ca. 12,5 m

Kurve 3 mit $w_0 = 14,3$
 Kurve 4 mit $w_0 = 7,0$
 ca. 8,0 m

Kurve 5 mit $w_0 = 11,1$
 Kurve 6 mit $w_0 = 7,7$
 ca. 3,5 m

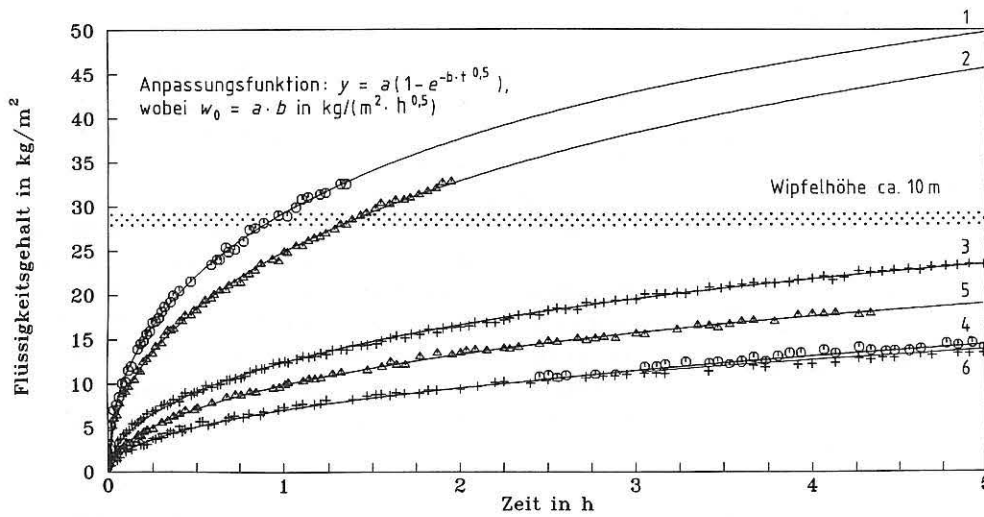


Bild 33: Kapillare Flüssigkeitsaufnahme von plattenförmigen Bruchstücken eines Glattputzes, die an der Westfassade eines Wohnhauses in unterschiedlicher Höhe entnommen wurden

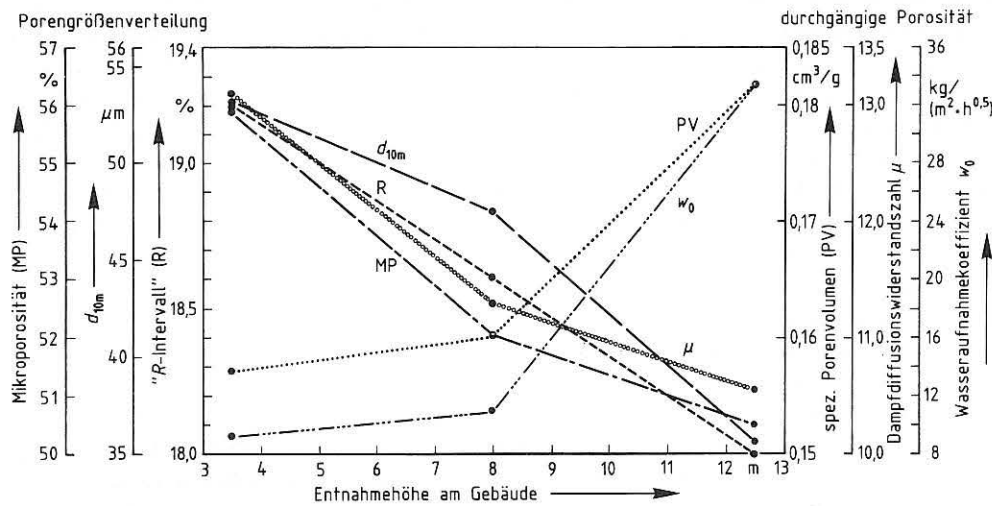


Bild 34: Kennwerte der Porengrößenverteilung eines etwa 40 Jahre alten Putzmörtels und ihre Änderung in Abhängigkeit von der Expositionshöhe am Gebäude

Entnahmeort: Orientierung: Höhe am Bauwerk in m: Tiefe in mm:	Fassade (Glattputz)					
	W		W		W	
	2 - 4		6 - 8		12 - 16	
	0 - 5	≥ 5	0 - 5	≥ 5	0 - 5	≥ 5
spezifisches Porenvolumen in cm^3/g	0,15	0,17	0,15	0,17	0,18	0,19
d_{10m} (Durchmesser) in μm	52,7	53,7	37,4	57,7	35,1	37,8
Ravaglioli-Intervall in %	20	19	20	17	18	17
Mikroporosität in %	58	54	54	50	51	48
Median (Radius) in μm	1,2	1,5	1,7	2,5	2,2	2,8
Wasseraufnahmekoeffizient w_0 in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	9,4		10,8		33,4	
Dampfdiffusionswiderstandszahl μ	13,1		11,3		10,6	

Tabelle 10: Kennwerte der Porengrößenverteilung - ermittelt an einem ungefähr 40 Jahre alten Putzmörtel - und deren Veränderung infolge unterschiedlicher Expositionsbedingungen in Abhängigkeit von der Höhe am Gebäude

Gleichzeitig erhöht sich mit dem Abstand vom Erdniveau auch der Sulfatgehalt, da die unteren Gebäudeteile augenscheinlich durch Baumbewuchs besonders abgeschirmt worden sind (Bild 35).

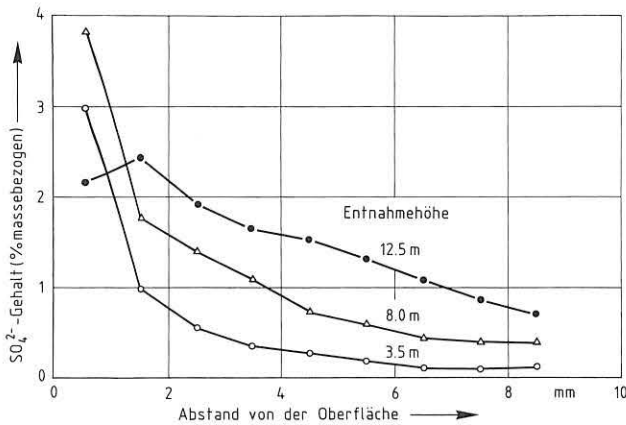


Bild 35: Abhängigkeit der Sulfataufnahme von der Entnahnehöhe; untere Gebäudeteile waren augenscheinlich durch Baumbewuchs geschützt

Dies steht im Einklang mit der Veränderung des d_{10m} -Werts, denn gleichsinnig wachsen verstärkt Gipskristalle in groben Poren und führen so zu einer Verengung derselben (vgl. Bild 36).

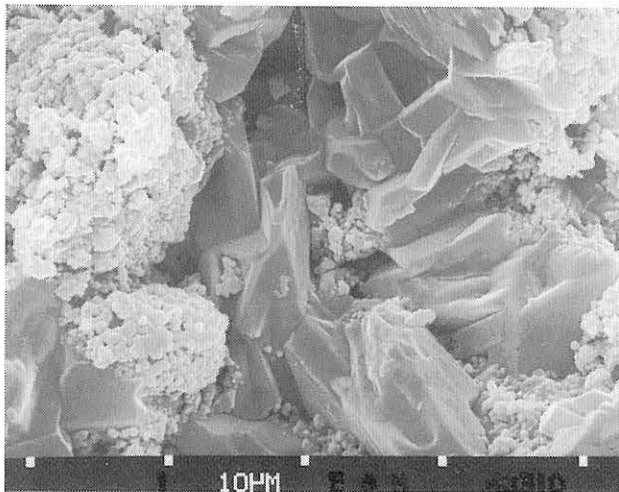


Bild 36: Verkleinerung von groben Poren durch hineinwachsende Gipskristalle

Dampfdiffusionsvorgänge finden gemäß Literaturangaben in Poren größer als 0,1 μm Durchmesser statt [55]. Da nach vorliegenden Befunden in größerer Höhe ein geringerer Diffusionswiderstand vorliegt, wird dieses Verhalten nicht oder nur wenig durch die Verkleinerung der groben Poren beeinflusst, sondern eher durch die Abnahme des Mikroporenanteils, die gleichzeitig mit einer Vergrößerung des spezifischen Porenvolumens verbunden ist. Auch was den Widerstand gegenüber Schleifverschleiß anbetrifft, zeigen die an Mörtelfragmenten ermittelten Kurven deutliche Unterschiede (Bild 37).

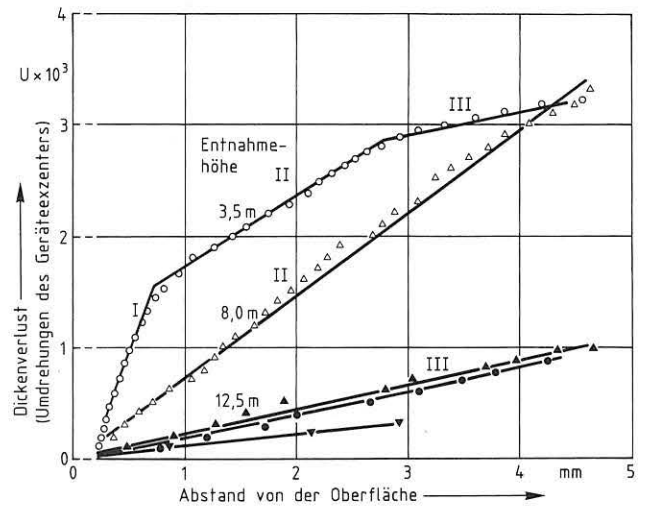


Bild 37: Veränderung des Verschleißverhaltens von Putzmörtelbruchstücken mit der Entnahnehöhe (römische Ziffern: Schichten gleicher Festigkeit)

Mit zunehmender Höhenlage verringert sich die Festigkeit, was in Übereinstimmung mit den Porendaten steht (geringerer Anteil an Mikroporen, Verlagerung des Medians zu größeren Poren, Zunahme des Porenvolumens, vgl. Bild 34). Auch hier tritt die erhöhte Verwitterungsintensität an oberen Gebäudeteilen gegenüber unteren deutlich hervor. Bei genauer Betrachtung fällt auf, daß das Verschleißverhalten der Probe aus 3,5 m Höhe einen dreigeteilten Kurvenverlauf annimmt. Der erste Teil bis etwa 1 mm Tiefe (I) ist durch einen steilen Anstieg der Summenkurve (Hinweis auf Kruste) gekennzeichnet (ca. 1700 Umdrehungen des Exzentrers/mm Tiefe). Daran schließt sich ein zweiter Abschnitt (II) mit ca. 600 /mm an, der sich zwischen 1 - 3 mm Abstand von der Probenoberfläche erstreckt. Der nächste Teil (III) weist dann lediglich 200 Umdrehungen/mm auf. Einen ähnlichen Anstieg wie bei letzteren findet man an Material aus größerer Höhenlage. Die Verschleißkurve von Mörtel aus 8 m Höhe spiegelt so näherungsweise den Kurvenabschnitt II aus 3,5 m wieder, während die aus 12,5 m Höhe dem Kurvenabschnitt III des vorgenannten Materials entspricht. So entsteht mit zunehmender Höhe am Bauwerk nicht nur der Eindruck einer Gefügearlockerung, sondern man trifft dort aufgrund des Abwitterns auch nicht mehr die Originaloberfläche des Mörtels an - ein Verdacht, der sich durch visuelle Begutachtung der entsprechenden Proben belegen läßt. So nimmt eine zonare Gliederung am Bauwerk Gestalt an, die ihren Ausdruck in der unterschiedlichen Verwitterungsintensität nach gleicher Standdauer findet, sei es nun als Sulfatanreicherung, wie von Grün im Jahre 1933 [27] beschrieben, oder aber in Form der Immissionsrate, die bereits von Luckat im Jahre 1974 für den Niederschlag der gasförmigen Luftverunreinigungen herangezogen worden ist [54].

An der Putzschale eines anderen Wohnhauses ließ sich ebenfalls nachweisen, daß neben einem ansteigenden Wasseraufnahmekoeffizienten die an vergleichbaren Proben ermittelten Dampfdiffusionswiderstandszahlen im umgekehrten Sinne verliefen (Bild 38).

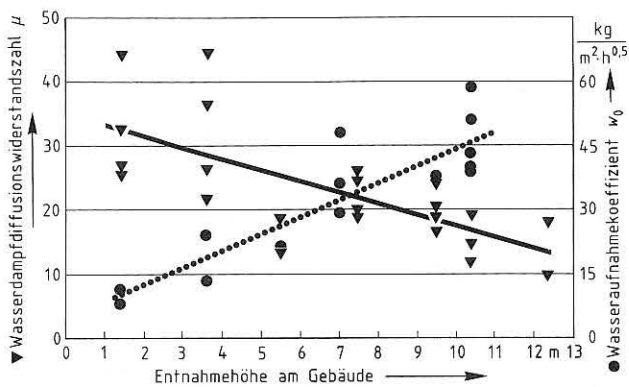


Bild 38: Wasserdampfdiffusion und Kapillarverhalten von Putzmörtelbruchstücken, an der Westfassade eines Wohnhauses in verschiedenen Höhen entnommen

Konstruiert man für dieses Gebäude ein dem Bild 34 analoges Diagramm aus den diskreten Werten der Hg-Porosimetrie, dem Wasseraufnahmekoeffizienten sowie dem μ -Wert, so zeigen die gegen die Entnahmehöhe der Proben aufgetragenen Werte - mit einer Ausnahme - die gleiche Tendenz (Bild 39).

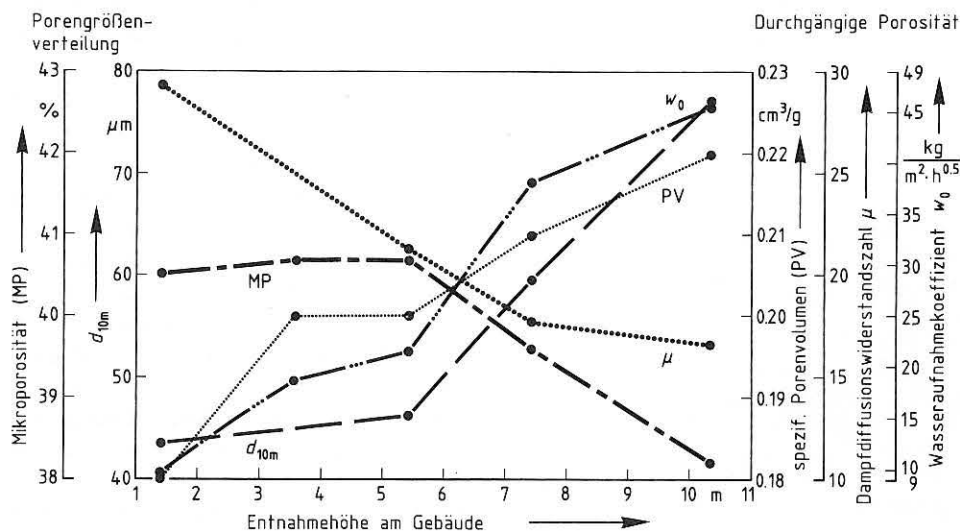


Bild 39: Porenmerkmale eines ca. 50 Jahre alten Putzmörtels auf der Basis von Weißkalk mit Zementzusatz sowie deren Veränderungen mit dessen Entnahmehöhe

Das spezifische Porenvolumen und der Wasseraufnahmekoeffizient nehmen zu, der Anteil an Poren $< 5 \mu\text{m}$ Durchmesser (Mikroporosität) sowie der Dampfdiffusionswiderstand dagegen ab. Aber anders als im ersten Fall zeigt der d_{10m} -Wert eine umgekehrte Tendenz. Deutlich verlagert sich dieser Wert, der ja ein Maß für die Veränderung der groben Poren darstellt, zu größeren Durchmessern hin. Sichtbar wird dies besonders beim Vergleich der Porenspektren von Proben aus 1,4 m und 10,5 m Höhe. Weshalb aber findet mit zunehmender Höhe einmal eine Verengung und einmal eine Aufweitung der größeren Poren statt? Die Erklärung dafür ist in der Gegenläufigkeit des Sulfatgehalts mit dem Grobporenanteil d_{10m} zu suchen (Bild 40). Denn es füllen sich mit steigender Gebäudehöhe ja zunehmend grobe Poren mit Mineralneubildungen, wobei sich ein bevorzugter Porendurchmesser herausbildet. Auf diese Weise entsteht eine direkte Beziehung zwischen dem

samtsulfatgehalt und den Porosimeterdaten, besonders dem d_{10m} -Wert. Mit zunehmender Entnahmehöhe nimmt der Gesamtsulfatgehalt der äußeren 5 mm dicken Mörtelschicht von $> 3 \%$ in 1,4 m Höhe auf ca. 1,7 % bei 7,4 m ab, und es verschiebt sich dementsprechend der d_{10m} -Wert der - allerdings aus größerer Tiefe stammenden - Proben von $40 \mu\text{m}$ auf $80 \mu\text{m}$. Diese Gleichstellung ist zulässig, da die beobachtete Tendenz auch in größerer Tiefenlage erhalten bleibt. So sind in einer Tiefe von $> 5 \text{ mm}$ in 1,4 m Höhe noch Gehalte $> 1 \%$ vorhanden, während die bei 7,4 m in entsprechender Tiefe nur noch ca. 0,5 % zeigen.

Unter Umständen spielen dabei Auslaugungsprozesse eine Rolle. In diesem Zusammenhang muß aber darauf hingewiesen werden, daß an den oberen Gebäudepartien die Putzoberfläche erheblich abgewittert ist und somit nicht die Originaloberfläche für die Untersuchung zur Verfügung gestanden hat. Wahrscheinlich ist, daß auch ein Pflanzenbewuchs (Bäume und Sträucher) auf die unteren Gebäudeteile eine Art Schutzfunktion ausübt, was Schlagregen bzw. Wind aber auch SO_2 anbetrifft.

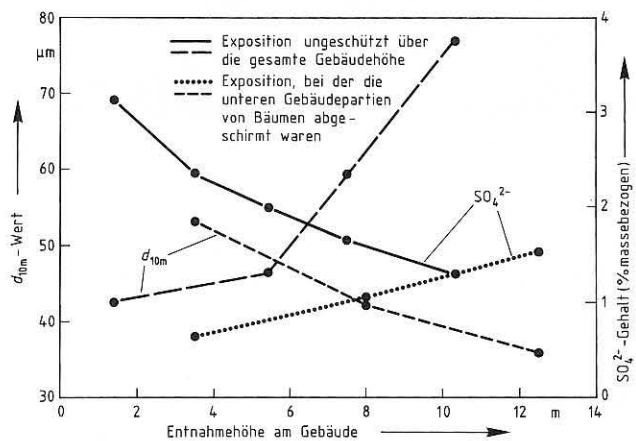


Bild 40: Jeweils gegenläufige Abhängigkeit von Sulfatgehalt und Grobporenanteil d_{10m} in ca. 40 bzw. 50 Jahre alten Außenwandputzen aus der jeweiligen Westfassade zweier Gebäude, aufgetragen gegen die Entnahmehöhe

Gegenüber dem zuerst beschriebenen Fall läßt sich hier eine Abnahme des Gesamtsulfatgehalts mit zunehmender Höhe am Gebäude feststellen, was sich in den entsprechenden Konzentrationsprofilen widerspiegelt (Bild 41). Wie eigentlich immer, verringert sich dabei der Sulfatanteil mit zunehmender Tiefenlage.

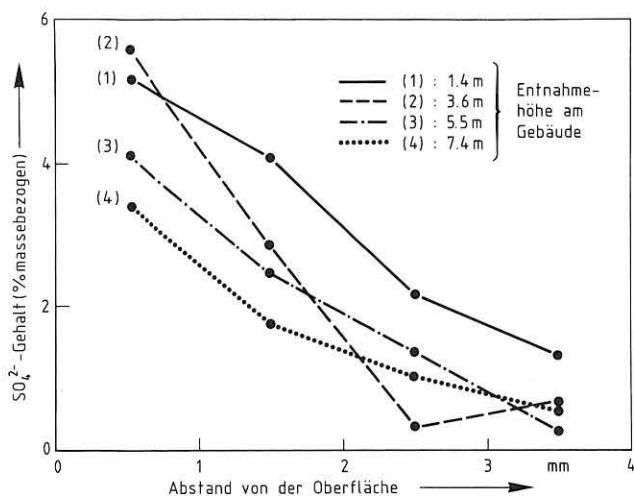


Bild 41: Sulfatverteilung in einem ca. 50 Jahre alten Putzmörtel von der Westfassade eines Wohnhauses, in verschiedenen Höhen entnommen

Die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Befunde, daß Nitrat und Chlorid im Mörtelinneren angereichert werden, kann man nun auch auf die Gebäudehöhe übertragen (siehe Bild 42). Jedoch treten hier nennenswerte Nitratmengen vor allem nur an den unteren Gebäudeteilen bis zu 4 oder 5 m Höhe auf. Ähnliches gilt für die Verteilung und Konzentration von Chlorid.

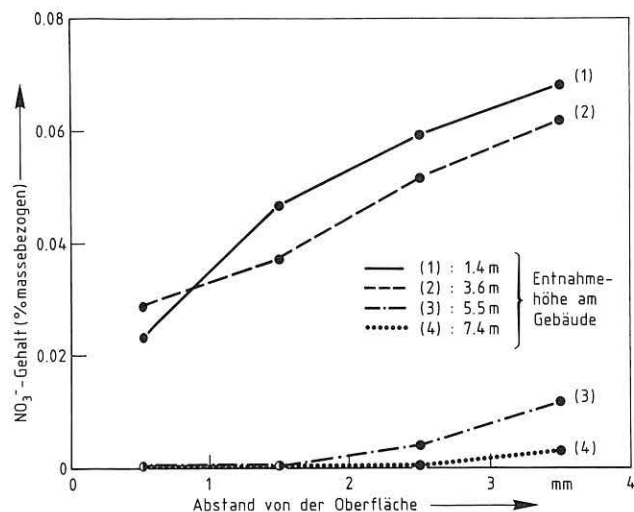


Bild 42: Vergleichendes Tiefenprofil, das die Nitratverteilung in einem ca. 50 Jahre alten Außenputzmörtel zeigt, von dem Proben in verschiedenen Gebäudehöhen entnommen wurden

5.5 Auslagerung der Baustoffe an Orten mit unterschiedlicher Schadstoffbelastung

Für die Auslagerungsversuche dienten unterschiedliche Mörtel mit Sumpfkalkhydrat, industriell gelöschtem Weißkalkhydrat, Dolomitkalkhydrat und hydraulischem Kalk sowie Normsand gemäß DIN EN 196 Teil 1 als Zuschlag (vgl. Abschnitt 2.2). Einem Dolomitkalk- und Weißkalkmörtel wurden jeweils geringe Anteile an Weißzement zugegeben.

5.5.1 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Die vor der Auslagerung an den Mörteln ermittelten Daten sind Tabelle 11 zu entnehmen. Aufgrund von Ergebnissen der coulometrischen CO₂-Bestimmung konnte angenommen werden, daß die Kalkmörtel gleichmäßig und nahezu vollständig carbonatisiert vorlagen, während der Zementzusatz wegen seiner dichtenden Wirkung (Erhöhung des Feinporenanteils, Behinderung der CO₂-Diffusion) vermutlich nur eine unzureichende Carbonatreaktion zugelassen hatte. Betrachtet man das Verschleißverhalten (vgl. Bild 43), so fällt auf, daß Sumpfkalk- und Weißkalkmörtel die geringste Festigkeit aufweisen, gefolgt von solchen mit Zementzusatz. Die höchste Festigkeit zeigt der Dolomitkalkmörtel, von dem bekannt ist, daß er eine hohe, hydraulischen Mörteln vergleichbare Frühfestigkeit liefert. Hydraulischer Mörtel weist an sich eine derart hohe Festigkeit auf, daß er nicht in Bild 43 eingetragen werden kann. Die Verschleißrate beträgt lediglich 2000 U/mm.

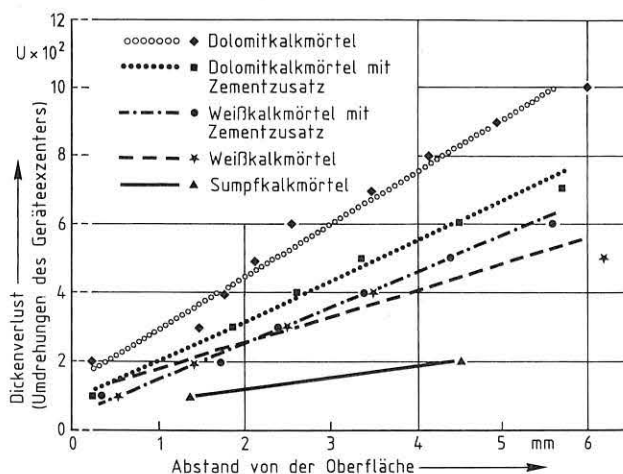


Bild 43: Verschleißverhalten der im Labor hergestellten Putzmörtel vor der Auslagerung, abhängig von ihrer Zusammensetzung

Drückt man dieses Verhalten in Werten aus, so erhält man für einen

- Sumpfkalkmörtel	ca. 50 U/mm	Verschleißrate
- Weißkalkmörtel	ca. 70 U/mm	"
- Weißkalkmörtel mit Zementzusatz	ca. 110 U/mm	"
- Dolomitkalkmörtel mit Zementzusatz	ca. 130 U/mm	"
- Dolomitkalkmörtel	ca. 180 U/mm	" und
- hydraulischer Kalk	ca. 2000 U/mm	"

Tabelle 11: Charakterisierung der Mörtel vor ihrer Auslagerung)

Material	Gefügedaten (0 - 5 mm Tiefe)				spezifische Oberfläche m ² /g	Sulfat- gehalt %	Carbonat- gehalt %	Dampfdiffusion- s- widerstandszahl μ	Wasserauf- nahme- koeffizient w_0 (kg/(m ² · h ^{0,5}))
	spezifisches Porenvolumen cm ³ /g	$d_{10,m}$ μm	Ravaglioli- Intervall %	Mikro- porosität %					
Weißkalkmörtel	0,135	- ¹⁾	16,9	48,6	0,63	n.n. ²⁾	2,76	11,0	13,9
Dolomitkalkmörtel	0,126	- ¹⁾	9,6	39,2	0,52	n.n. ²⁾	1,34	10,9	26,7
Sumpfkalkmörtel	0,125	- ¹⁾	6,3	45,7	0,53	0,02	3,15	9,5	25,7
Weißkalkmörtel mit Zementzusatz	0,143	9,79	44,9	80,7	1,48	0,02	4,32	11,5	21,1
Dolomitkalkmörtel mit Zementzusatz	0,123	16,33	34,8	82,4	1,37	0,04	3,24	12,7	11,9
Hydraulischer Mörtel	0,117	- ¹⁾	19,3	53,9	1,11	n.b. ³⁾	3,72	13,7	9,5

¹⁾ außerhalb des Erfassungsbereichs des Verfahrens

²⁾ nicht nachweisbar

³⁾ nicht bestimmt

Die Summenkurven der Verschleißraten für das betreffende Material verlaufen dabei nahezu linear. Dies deutet auf eine vergleichbare Festigkeit in jeder Tiefenlage hin und stellt eine gute Voraussetzung dar, Veränderungen als Folge atmosphärischer Einflüsse sichtbar zu machen.

5.5.2 Zeitabhängige Veränderungen

Bis Mitte 1992 befanden sich fünf verschiedene Putzmörteltypen 1,5 Jahre lang auf den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Gestellen. Die sechste Probenart - ein hydraulischer Kalkmörtel - wurde erst zu einem späteren Zeitpunkt ausgelagert. An diesen 90 Tage bei 90 % r.F. und 20 °C vorgelagerten Platten lassen sich folglich drei Stadien miteinander vergleichen: Ausgangszustand, halbjährige und 1,5jährige Exposition. Was die beiden Dolomitkalkmörtel anbetrifft, so zeigt der zementhaltige an allen Standorten auch nach 1,5 Jahren noch keine Veränderung des Sulfatgehalts im obersten Millimeter, während derjenige ohne Zusatz geringfügig höhere Werte als das Ausgangsmaterial aufweist, die aber über die Zeit konstant bleiben. Lediglich die Kalkmörtel mit und ohne Zementzugabe haben meßbare Mengen an SO₂ aufgenommen (Bild 44). Beispielhaft für den Auslagerungsort Gottlieb-Dunkel-Straße bedeutet dies, daß der Sumpfkalkmörtel mit einem massebezogenen Ausgangsgehalt an SO₄²⁻ von 0,06 % nach einem halben Jahr 0,09 % und nach 1,5 Jahren 0,12 % aufweist, und entsprechend im Weißkalkmörtel der Sulfatanteil von 0 % über 0,04 % auf ca. 0,33 % ansteigt. Proben von den anderen Entnahmestellen liefern vergleichbare Werte. Eine plausible Abfolge in ihrer Reaktion mit dem Schadgas ist nur insoweit zu erkennen, als am Lerschpfad (höchste Konzentration in der Luft) auch maximale SO₄²⁻-Gehalte in den Proben vorlagen. Da sich diese Ergebnisse immer nur auf den äußersten Millimeter der Mörtelschicht beziehen, bleibt einem die nächste Ernüchterung nicht erspart, wenn man in die Tiefe geht.

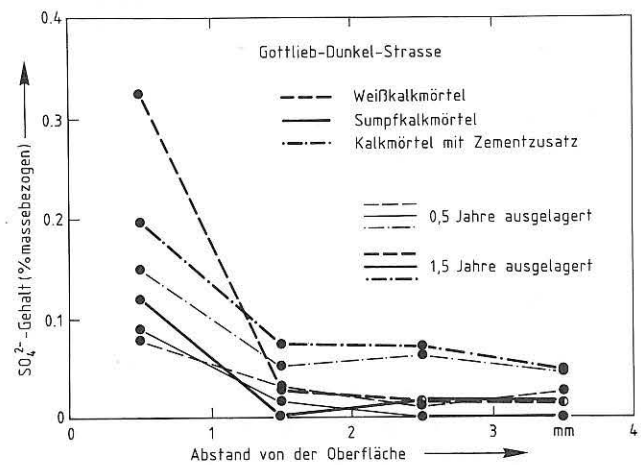


Bild 44: Sulfatanreicherung in der obersten Schicht verschiedener Mörteltypen nach unterschiedlichen Auslagerungszeiten

Anscheinend wird nämlich nur der erste Millimeter durch atmosphärisches SO₂ direkt beeinflusst, denn schon in 2 mm Tiefe liegen alle Werte nur noch geringfügig oberhalb derjenigen bei Versuchsbeginn (vgl. Bild 45).

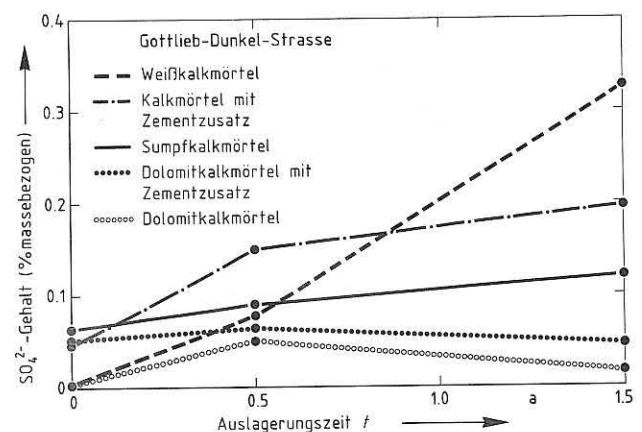


Bild 45: Vergleich der Konzentrationsprofile von Sulfat in Mörteln nach 0,5 und 1,5 Jahren Auslagerung

Erwähnenswert scheint, daß ein Unterschied von bis zu 0,02 % SO_4^{2-} (massebezogen) im Grenzbereich dessen liegt, was selbst durch optimale Probenvorbereitung (exakter Abtrag einer 1 mm dicken Mörtelschicht, Einwaaage, Extraktion etc.) zu erreichen ist. Da also nur eine unbedeutende chemische Reaktionen stattgefunden hat, wären Gefügeveränderungen auch nur in geringem Umfang zu erwarten. Falls überhaupt, könnten davon lediglich die oberen 5 mm der Mörtelschicht betroffen sein, die demzufolge für entsprechende Vergleiche auch nur infragekommen.

So zeigen die beiden Mörtel mit Dolomitmalkhydrat, die offensichtlich die geringsten chemischen Veränderungen erfahren haben, demnach auch keine Tendenzen einer Gefügeentwicklung über die Expositionszeit, einmal abgesehen vom Wasseraufnahmekoeffizienten, der an allen Auslagerungsorten ansteigt (Bild 46). Dabei tritt nach 1,5 Jahren am Ort der niedrigsten Schadstoffbelastung der größte Wert ($26,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$) bzw. an demjenigen der höchsten der geringste ($19,6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$) auf. Auch beim zementhaltigen Kalkmörtel ist keine systematische Veränderung von w_0 oder dem Dampfdiffusionswiderstand zu erkennen. Am ehesten ließe sich noch eine äußerst geringe Abnahme des spezifischen Porenvolumens feststellen, sofern man nicht alle Auslagerungsorte berücksichtigt. Das kann als Hinweis auf Nachhydratation bzw. Carbonatisierung und somit eine Gefügeverdichtung gelten.

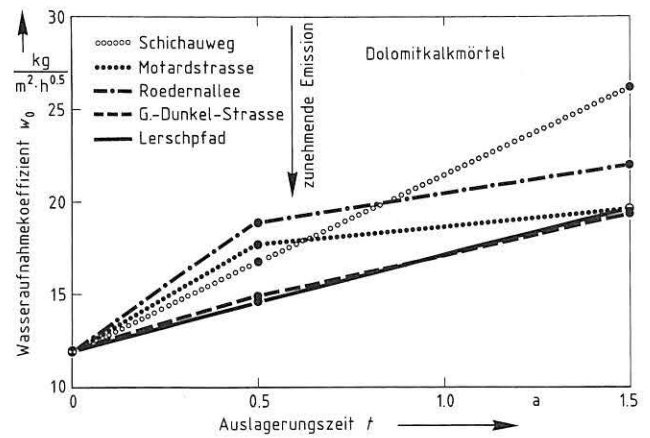


Bild 46: Anstieg des Wasseraufnahmekoeffizienten w_0 von Dolomitmalkputz an den jeweiligen Auslagerungsorten

Aber 1,5 Jahre Freilagerung unter den zur Zeit herrschenden Bedingungen erweisen sich einfach als zu kurz, um systematische Veränderungen in einem solchen Baustoff zu erzeugen. Die vorgefundenen Tendenzen sind daher auch mit Vorsicht zu betrachten, zumal sie mitunter innerhalb der Schwankungsbreite der Ergebnisse liegen und nur durch entsprechende Spreizung des Maßstabs sichtbar werden. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß wegen ihrer geringen chemischen Veränderungen, die Kalkmörtel (Sumpfkalk- bzw. Weißkalkmörtel) gegenüber

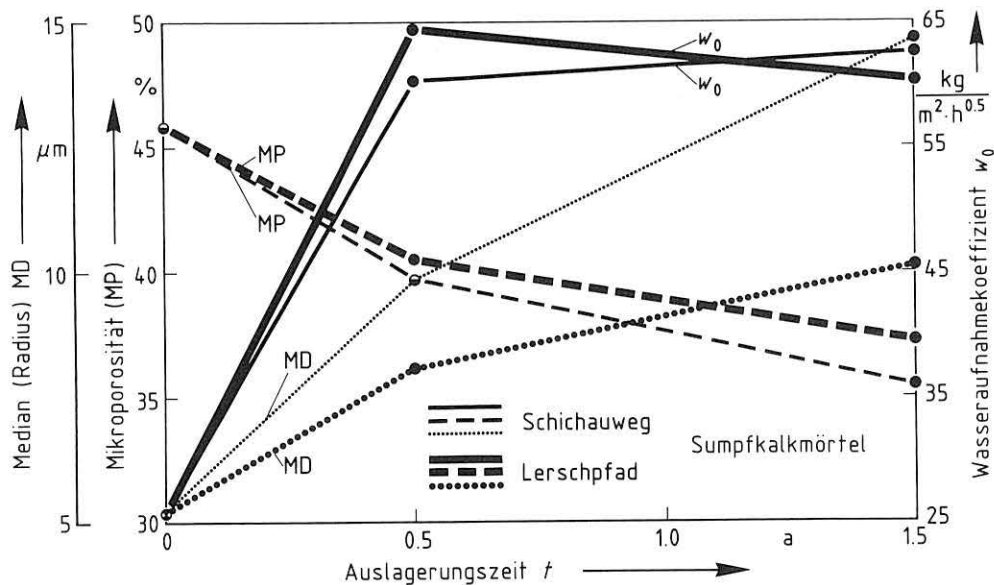


Bild 47: Veränderung der porenbezogenen Parameter in einem Putzmörtel bei minimaler und maximaler Schadstoffbelastung

Beim Weißkalkmörtel scheint aber ebensowenig ein "konsequentes" Verhalten vorzuliegen, während wiederum Sumpfkalkmörtel eine klare Abhängigkeit zeigt. So verlagert sich an drei von fünf Orten der Median zu größeren Porenradien hin, und der Anteil an Mikroporen mit Durchmessern $< 5 \mu\text{m}$ nimmt ab. Wenn auch mit geringen Schwankungen vergrößert sich auf die Dauer überall der Wasseraufnahmekoeffizient. In Bild 47 sind die betreffenden Kennwerte stellvertretend für Proben vom Schichauweg (geringste SO_2 -Belastung) und Lerschpfad (höchste Belastung) aufgetragen.

den nicht exponierten Äquivalenten sowohl nach 0,5 als auch nach 1,5 Jahren nahezu identische Verschleißprofile zeigen (Bild 48). Dies gilt für Orte mit hoher (Lerschpfad) und niedriger Schadstoffbelastung (Schichauweg). Weißkalkmörtel mit Zementzusatz läßt lediglich in Autobahnnahe (Lerschpfad) eine höhere Festigkeit erkennen. Die Oberfläche aller dort exponierten Proben waren dunkel verfärbt, was wahrscheinlich durch vom Verkehr stammende Anwehungen (Reifenabrieb, Schmutz) verursacht worden ist.

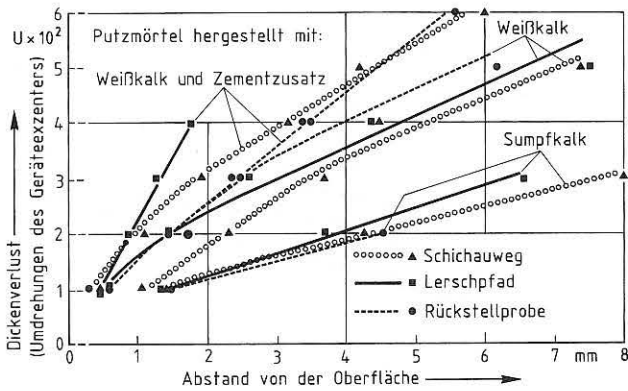


Bild 48: Vergleich von Verschleißprofilen in Kalkmörteln nach 1,5-jähriger Exposition

Auch die Dolomitmalkmörtel zeigen bis zu 0,5 Jahren Lagerung offenbar nur geringe Veränderungen, was in einer nur unwesentlichen Oberflächenverfestigung zum Ausdruck kommt. Nach 1,5 Jahren sind jedoch drastische Unterschiede gegenüber den Kalkmörteln zu beobachten, die besonders bei Material ohne Zementzusatz deutlich werden (vgl. Bild 49). Material vom Lerschpfad ähnelt in seinem Verhalten zwar noch sehr dem der Rückstellproben, entsprechende Mörtel vom Schichauweg (geringe NO_x - und SO_2 -Belastung) zeigen dagegen einen vergleichsweise hohen Verschleißwiderstand (ca. 1800 Umdrehungen des Exzentrers/mm Tiefenfortschritt).

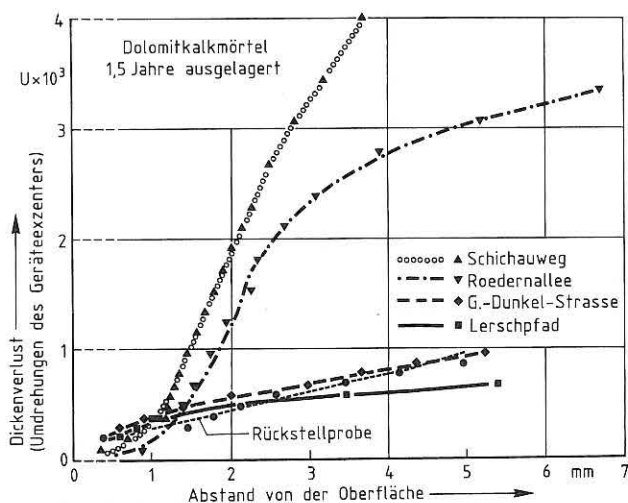


Bild 49: Vergleich von Verschleißprofilen in Dolomitmalkmörteln nach 1,5-jähriger Exposition

Dies ist mit ihrem höheren Carbonatgehalt allein nicht zu erklären. Vielmehr müssen noch andere Einflüsse wirksam geworden sein, wie z.B. eine durchschnittlich höhere relative Luftfeuchte bzw. eine verstärkte Möglichkeit der Taubildung. Ein derartiger Mörtel benötigt nämlich zu seiner optimalen Festigkeitsentwicklung - anfangs liegen schwerlösliches $\text{Mg}(\text{OH})_2$ und MgO neben den amorphen Mg-Carbonaten und natürlich der Ca-Komponente vorüber längere Zeit einen höheren Feuchtigkeitsgehalt als Kalkmörtel (vgl. hierzu [42]). Dies erklärt auch die Ähn-

lichkeit der Verschleißprofile von Rückstellproben und der vom Lerschpfad, obwohl bei letzteren durch Sprühnebel kurzfristig sehr hohe Feuchtigkeitsgehalte aufgetreten sind, die jedoch keinen Einfluß auf die Carbonatisierung ausgeübt haben. Porendaten können ebenfalls zur Klärung herangezogen werden. So differieren die Porenvolumina (0-5 mm Profiltiefe) erheblich: $0,106 \text{ cm}^3/\text{g}$ zeigt das Material vom Schichauweg und $0,121 \text{ cm}^3/\text{g}$ das vom Lerschpfad, was auf eine größere Kompaktheit von ersterem hindeutet. Dagegen lassen die diskreten Werte der Porengrößenverteilung keine deutbaren Unterschiede erkennen.

Dolomitmalkmörtel mit Zementzusatz weisen gegenüber ihren Äquivalenten ohne hydraulischen Anteil ein völlig anderes Verschleißverhalten auf. Hier drehen sich die Verhältnisse offensichtlich um (Bild 50), so daß diesmal Proben vom Schichauweg den Rückstellproben nahezu entsprechen, während die vom Lerschpfad mit hoher SO_2 -Belastung deutlich fester sind. Die Summenkurve der Verschleißbeträge hat sogar einen nahezu linearen Verlauf, was auf einen vergleichbaren Gefügezusammenhalt in jeder Tiefenlage hindeutet. Dieser Mörteltypus ähnelt damit stark dem Kalkmörtel mit Zementzusatz, der leider schon nach 400 Umdrehungen des Exzentrers zerbrochen ist und so nur bis 2 mm Tiefe die Ermittlung eines Profils zugelassen hat (vgl. Bild 48). Am Lerschpfad herrschen also bessere Erhärtungsbedingungen für zementhaltiges Material, wie sie vielleicht Sprühnebel von der Autobahn während und nach einem Regenfall darstellen. Außerdem weist dieser Ort den höchsten Schwebstaubanteil auf. Am Schichauweg reichte das Angebot derartiger Medien für eine verstärkte Hydratation augenscheinlich nicht aus.

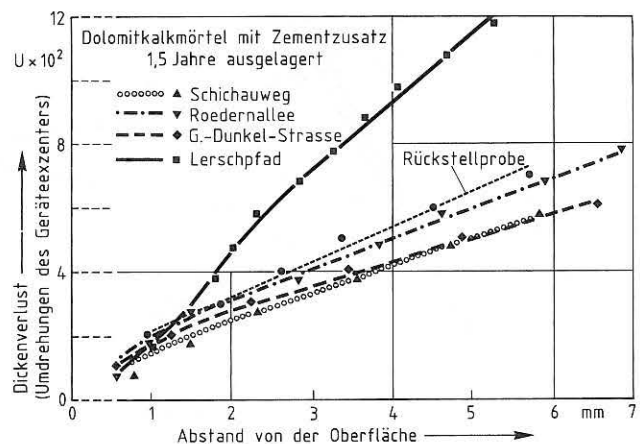


Bild 50: Vergleich von Verschleißprofilen in Dolomitmalkmörteln mit Zementzusatz nach 1,5-jähriger Exposition

Auch die Porendaten erklären die unterschiedlichen Verschleißkurven, wobei wiederum nur die Porenvolumina eindeutige Tendenzen erkennen lassen ($0,122 \text{ cm}^3/\text{g}$ in Material vom Lerschpfad, $0,138 \text{ cm}^3/\text{g}$ in solchen vom Schichauweg). Daß hier der Dolomitmalk mit Zementzusatz nicht so fest geworden ist, obwohl ein hohes Feuchtigkeitsangebot vorliegt, bedarf noch einer plausiblen Deutung.

5.5.3 Einfluß der Expositionsbedingungen auf das Materialverhalten

Aus den verbliebenen geringen Unterschieden der Schadstoffbelastung an den einzelnen Auslagerungsorten läßt sich schließen, daß im Stadtgebiet von Berlin klimatische Faktoren stärker die Baustoffe beeinflussen, als es atmosphärisches SO₂ vermag. Daher überrascht es schon, wenn der Weißkalkmörtel dennoch systematische Gefügeveränderungen in Richtung zunehmender Immission erfahren hat. In Bild 51 sind Parameter wie der Median und die Mikroporosität, aber auch der Wasseraufnahmekoeffizient für die jeweiligen Expositionsorte aufgetragen worden, wobei deren Reihung auf der Ordinate nach zunehmender SO₂-Konzentration in der Außenluft erfolgt ist. Bei erhöhter SO₂- und NO_x-Immission ist eine Abnahme des Anteils an Mikroporen sowie eine Verlagerung des Medians zu größeren Poren hin festzustellen, was folgerichtig mit einer Verringerung des Wasseraufnahmekoeffizienten verbunden ist. Der Einfluß der Zeit kommt darin zum Ausdruck, daß der Mikroporenanteil des Mörtels nach 1,5 Jahren Exposition höher und dementsprechend der Porenradius an der 50 %-Fraktile der Porenverteilungskurve kleiner ist als bei den kürzer ausgelagerten, während der Wasseraufnahmekoeffizient davon anscheinend nicht wesentlich betroffen wird.

Trotz der geringen SO₂-Aufnahme und der augenscheinlich erheblichen Wirkung, den örtlich wechselnde klimatische Bedingungen auf Mörtel ausüben, ist es erstaunlich, daß auch das Verschleißverhalten systematischen Veränderungen in Richtung zunehmender bzw. abnehmender Immission aufweist. Doch nicht alle Materialien sind davon betroffen. So unterliegen Kalkmörtel diesen Einflüssen nicht so sehr, obwohl porenraumbezogene Parameter sich verändert haben (siehe Bild 51). Besonders Mischungen, die trotz 90tägiger Vorlagerung bei 20 °C / 90 % r.F. während des Aufbringens auf die Auslagerungsgestelle nicht vollständig erhärtet vorgelegen haben, zeigen dieses Phänomen. Es sind dies diejenigen mit Zementzusatz und solche mit Magnesia-Komponente. In Richtung auf abnehmende SO₂- und NO_x-Immissionen - also von Lerschpfad über Gottlieb-Dunkel-Straße zu Roedernallee und Schichauweg - unterliegen zunehmend tiefere Bereiche von Dolomitmalkmörtel einer Verfestigung (siehe Bild 48), was sich jedoch nicht in den CO₂-Gehalten widerspiegelt. So weisen Proben vom Schichauweg bis etwa 4 mm Tiefe einen mittleren Wert von 2,11 % auf, die von der Roedernallee einen von 2,97 % während am Lerschpfad 2,35 % gemessen wurden. Mehr Aussagen als die Mittelwerte liefert jedoch eine CO₂-Verteilung. In Tabelle 12 ist diese exemplarisch für drei Auslagerungsorte im Vergleich zu der vor der Auslagerung aufgetragen worden.

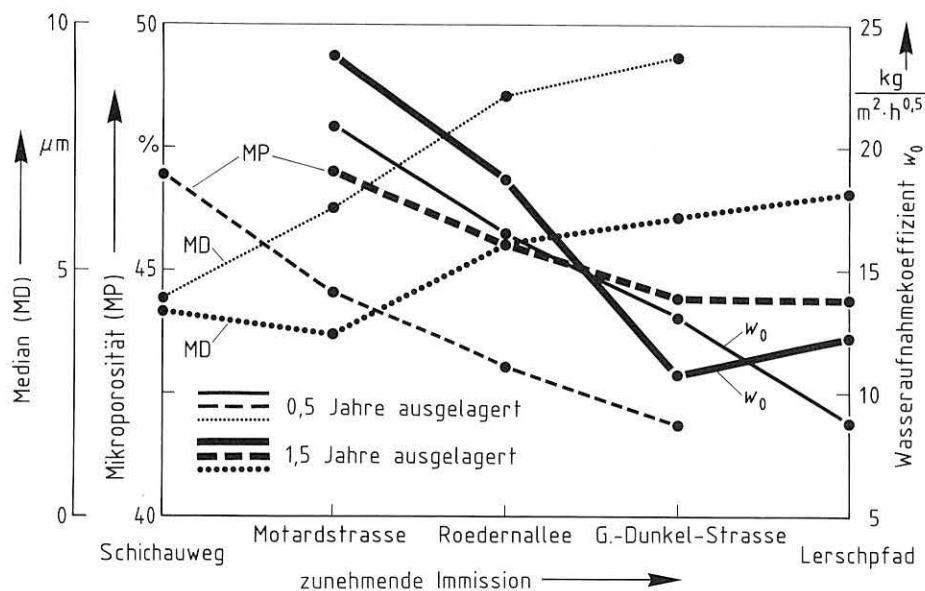


Bild 51: Veränderung der porenbezogenen Parameter in einem Weißkalkmörtel als Funktion der Schadstoffbelastung

Abstand von der Oberfläche (mm)	CO ₂ -Gehalt in % massebezogen			
	vor der Auslagerung	nach 1,5 Jahren Auslagerung		
		Schichauweg g	Roedernallee	Lerschpfad
1		2,58	3,85	2,57
2	im Mittel	2,36	3,27	2,20
3	1,34	2,23	2,30	--
4		1,28	2,47	2,28

Tabelle 12: CO₂-Konzentrationsprofile in Dolomitmalkmörtel an drei Auslagerungsorten und vor der Exposition

Wiederum ist zu erkennen, daß die Carbonatisierung allein nicht für die höhere Festigkeit des Dolomitmörtels verantwortlich sein kann, sondern daß am Schichauweg günstigere Erhärtungsbedingungen für diesen geherrscht haben müssen (vgl. dazu Abschnitt 5.5.2). Zur Erklärung bietet sich die mit einem gegenläufigen Gefälle von mittlerer Temperatur und relativer Luftfeuchte zwischen Stadtzentrum und Außenbezirken im Zusammenhang stehende, von F i t z [22] diskutierte "time of wetness" als wesentlicher Gesichtspunkt an. Dies bedeutet, daß ein ständiges, relativ niedriges Feuchtigkeitsangebot für dieses Material wichtiger ist, als ein hohes infolge von kurzzeitigen Sprühnebeln. Denn bei geringem Angebot in der Frühphase entzieht Rest-MgO dem entstandenen $Mg(OH)_2$ innerlich Wasser, was zu einer Festigkeitserhöhung beiträgt [94]. Die dadurch hervorgerufene Volumenvergrößerung der Bindemittelteilchen führt zu einer Verkleinerung des Porenvolumens. Aufgrund der anschließenden Verfestigung des Mörtels durch Austrocknen und Verkitten des $Mg(OH)_2$ -Gels wird dann die hohe Endfestigkeit erzielt. Im Laufe der Zeit wird dieses Gel kristallin [59], d.h. es "altert" und bildet thermodynamisch beständigere Produkte mit geordneter Kristallstruktur und höherer Korngröße [5], was zu einer weiteren Verdichtung des Mörtels beiträgt. Letztgenannte Ursache scheint hier besonders zum Tragen gekommen zu sein. Auch Dolomitmörtel mit Zementzusatz zeigen eine umgekehrte Abfolge der Gefügestärke, so daß am Lerschpfad die günstigsten und am Schichauweg die ungünstigsten Erhärtungsbedingungen vorgelegen haben müssen (vgl. Bild 50). Auf die möglichen Gründe dafür ist schon im Absatz 5.5.3 hingewiesen worden. Darüber hinausgehende Aussagen sind zur Zeit nicht möglich. Erst durch die für das 2. Halbjahr 1995 vorgesehene Entnahme weiterer Proben besteht die Möglichkeit, eine bisher beobachtete Tendenz als echte Abhängigkeit zu bestätigen.

5.6 Untersuchungen zum Einfluß der Mörtelkomponenten (Sand, Bindemittel und Anmachwassergehalt) auf die physikalisch-technischen Kennwerte

In Abschnitt 5.2 über den Einfluß des Mischungsverhältnisses von Mörteln auf das Gefüge und die Sulfataufnahme konnte schon gezeigt werden, daß magere Mörtel mehr Sulfat in der äußersten 1 mm dicken Oberflächenschicht aufgenommen hatten als fettere. Dies war Ausgangspunkt für Überlegungen, wie man durch Variation von Korngröße und Anteil an Sand sowie Bindemittel und Wasserbedarf das Gefüge eines Mörtels gezielt verändern kann und wie sich das auf die physikalisch-technischen Eigenschaften und Merkmale auswirkt. So hängen Feuchtigkeits-transport und Verwitterungsverhalten - natürlich gemäß den bauphysikalischen Gegebenheiten - unmittelbar miteinander zusammen, und man kommt auf diesem Wege dem Ziel etwas näher, die Eigenschaften eines Materials aus dessen Gefüge zu erklären. Einige Ergebnisse zu die-

sem Programm sind bereits veröffentlicht worden [34]. Als Grundlage für die Experimente dient die Vorstellung, daß in einem Mörtel ein komplexes Gemisch aus erhärtetem Bindemittel, Zuschlagsand sowie Poren vorliegt, deren Anteil, Größe und Verteilung wesentlich vom Mischungsverhältnis, der Sieblinie des Sands und der Menge des Anmachwassers bestimmt werden. Jeder weiß, daß ein Mörtel durch Erhöhung des Bindemittelanteils fester wird, seine Neigung zur Reißbildung jedoch zunimmt. Ein feiner Sand benötigt zur besseren Verarbeitbarkeit eine höhere Wassermenge, die ihrerseits jedoch die Porosität gegenüber einem anderen Mörtel vergleichbarer Zusammensetzung und Sieblinie vergrößert, womit eine Abminderung der Festigkeit verbunden ist. Entnimmt man Proben am Gebäude, so lassen sich zwar Mischungsverhältnis und Kornzusammensetzung ermitteln, nicht jedoch der verwendete Wassergehalt, der aber zur Gefügeentstehung wesentlich beiträgt. Da bei einer üblichen Mörtelmischung im allgemeinen nicht mehr Daten angeboten werden, Transport und Speicherung von Feuchtigkeit dagegen über den offenen Porenraum erfolgen, sind weitere Kriterien zur Beurteilung des Porensystems notwendig. Mithin bleibt es bei Versuchen zum Nachstellen historischer Mörtel (vgl. [67]) unerlässlich, Porenvolumen-, größenverteilung und andere physikalisch-technische Daten, wie zum Beispiel kapillare Wasseraufnahme und Dampfdiffusionswiderstand zu erfassen, um durch systematische Variation den Einfluß von Bindemittel, Zuschlag und Wasser auf die jeweiligen Parameter herauszuarbeiten.

5.6.1 Sande (Mörtelzuschlag)

Aufgrund der obenerwähnten Zielsetzung wurde folgende Vorgehensweise gewählt: Für alle beabsichtigten Versuche fand ein Normsand gemäß DIN EN 196 Teil 1 Verwendung. Von diesem wurden durch Absieben des Grobkornanteils Fraktionen mit der Korngröße < 1 mm, $< 0,5$ mm, $< 0,25$ mm und $< 0,16$ mm gewonnen. In Bild 52 ist deren Korngrößenverteilung dargestellt.

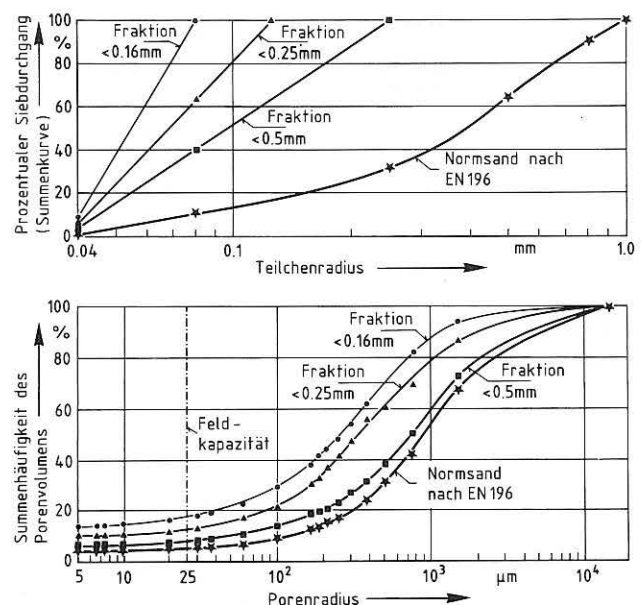


Bild 52: Korn- und Porengrößenverteilung der verwendeten Sande

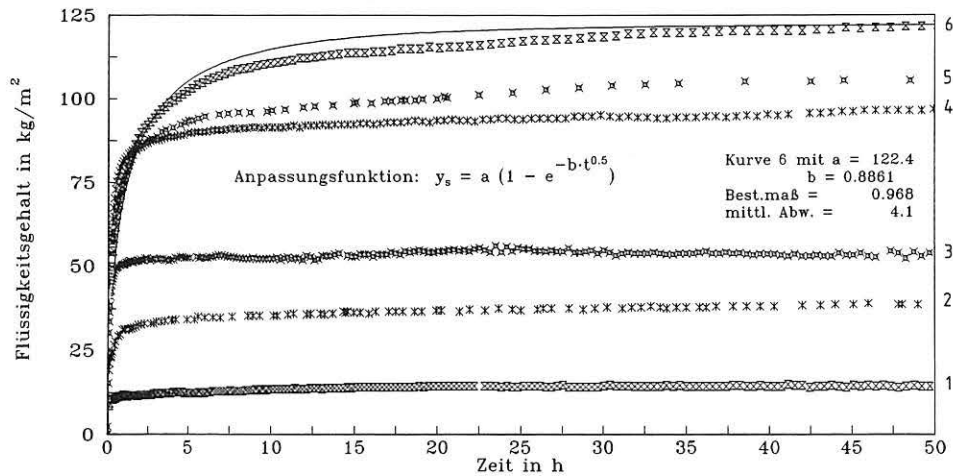


Bild 53:
Kapillartransport in Sanden:
1 - Fraktion > 0,5 mm
des Normsands nach
DIN EN 196 Teil 1;
2 - Normsand;
3 - Fraktion < 1,0 mm;
4 - < 0,5 mm; 5 - < 0,25 mm;
6 - < 0,16 mm

Ein in der Bodenkunde schon lange gebräuchliches Verfahren - die Messung der Saug- bzw. Wasserspannung - gestattet es, auch die Porenradien in Lockermassen zu bestimmen (C r o n e y, C o l e m a n und B r i d g e [6]). Da Wasser als Versuchsmedium dient, ist anzunehmen, daß dadurch in der Praxis ablaufende Vorgänge mit größerer Sicherheit erfaßt werden. Durch Anlegen eines definierten Drucks wird ein bestimmter Teil des gespannten Wassers aus den Poren entfernt. Anhand dieser Ergebnisse kann vorausgesagt werden, wieviel davon bei welcher Saugspannung bzw. entsprechendem Druckpotential in der Probe verbleibt. Durch stufenweise Variation des Drucks erzeugt man somit einen sinkenden Feuchtigkeitsgehalt im Baustoff. Jedem Druck kann ein bestimmter Porenradius zugeordnet werden. Für Wasser gilt die Näherungsgleichung $r = 1500/P$, wobei r dem Porenradius in nm und P dem angelegten Druck in 10^5 Pa entspricht. Man erhält damit unter anderem Aussagen über Porenvolumen und Verteilung der Porengrößen (vgl. K r u s und K i e s s l [50] sowie T o m b e r s [88]). Im unteren Teil von Bild 52 lassen solche Kurven erkennen, daß sich mit abnehmender Korngröße der Sande das Porenspektrum zu kleineren Radien hin verlagert. Die jeweiligen Porenvolumina sind gleich 100 % gesetzt worden. In einem Bereich unterhalb des Durchmessers von 50 μm , in der Bodenkunde Feldkapazität genannt, kann Wasser durch Kapillarkräfte gerade noch gehalten werden, während bei größeren Poren die gravitative Entwässerung überwiegt. Der Volumenanteil an Poren dieser Größe könnte somit als Kriterium für die Kapillarität herangezogen werden. Wie schon erwähnt, ist in der Bundesanstalt eine Funktion zur Beschreibung des kapillaren Flüssigkeitsaufstiegs aufgestellt worden, der sowohl Ziegel, Mörtel, manche Betone wie auch zahlreiche Natursteine, freilich nicht alle Sande folgen. In Bild 53 sind Kurven für die Kapillarförderung von sechs Sanden unterschiedlicher Korngröße dargestellt. Lediglich die Saugkurve des Sands der Fraktion < 0,16 mm Durchmesser paßt sich mit relativ hohem Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion an. Aus diesen Ergebnissen geht der Gültigkeitsbereich der vorgenannten Beziehung hervor. Erst ab einem Volumenanteil der Poren < 50 μm Durchmesser von ca. 20 % läßt sich vorerst nur bei Sanden - von einer "echten" Kapillarförderung sprechen.

Aus den Versuchen kann man noch weitere Kennwerte erhalten, wie z.B. Lagerungsdichte, Porenvolumen und Füllungsgrad nach dem kapillaren Saugen sowie die Feldkapazität. Dies ist möglich gewesen, weil für die Versuche immer ein gleiches Sandvolumen nach definierter Verdichtung herangezogen worden ist.

Die Beziehung dieser Parameter zur Korngröße in Bild 54 zeigt, daß mit feiner werdendem Sand die Lagerungsdichte (=Trockenrohddichte) zurückgeht; entsprechend steigen Porenvolumen und Füllungsgrad, weil mehr Poren im kapillaraktivem Bereich vorhanden sind, wie durch das Absinken des Werts bei der Feldkapazität bestätigt wird. Zwar soll hier keine Sandforschung betrieben werden, es scheint aber unumgänglich, zuerst den Sand zu definieren, bevor man darangeht, ihn mit Bindemittel und Wasser zu versetzen.

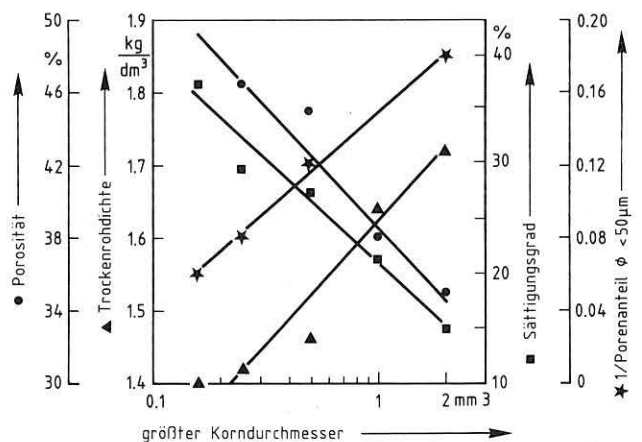


Bild 54: Veränderung von Gefügeparametern durch Verwendung von Sanden unterschiedlicher Korngröße

5.6.2 Kalkmörtel

Mauer- und Putzmörtel sind als ein in angemessener Zeit verfestigter Kitt zwischen Bausteinen zu verstehen, von denen eine Mindestfestigkeit im Kornverbund und an der Grenzfläche zum anderen Baustoff gefordert wird. Das Zuschlagkorn muß deshalb eingebunden und die Haufwerkszwischenräume mit Bindemittel aufgefüllt werden. Eine wesentliche Rolle spielt in diesem Zusammenhang jenes bisher nur unklar definierte Phänomen der Magerung, dessen Prinzip darin besteht, daß das reine Bindemittel die Zuschlagkörner mehr oder weniger umschließt oder die Porenwandungen auskleidet, so daß ein Spannungsabtrag erfolgen und so eine Rißbildung verhindert werden kann.

Jeder, der schon einmal Mörtel hergestellt hat, weiß zu berichten, wie schwierig eine gute Reproduzierbarkeit zu erreichen ist, auch bei gleichen Ausgangsbedingungen (z. B. in Hinblick auf Mischungsverhältnis und Wasserbedarf), und das bei Ausführung durch ein und dieselbe Person und bei einem Mörtel mit gleichen Eigenschaften! Die Streuung entsprechender Gefügedaten geht aus *Bild 55* hervor, in welchem die Porengrößenverteilung von Kalkmörtelchargen gleicher Rezeptur dargestellt sind.

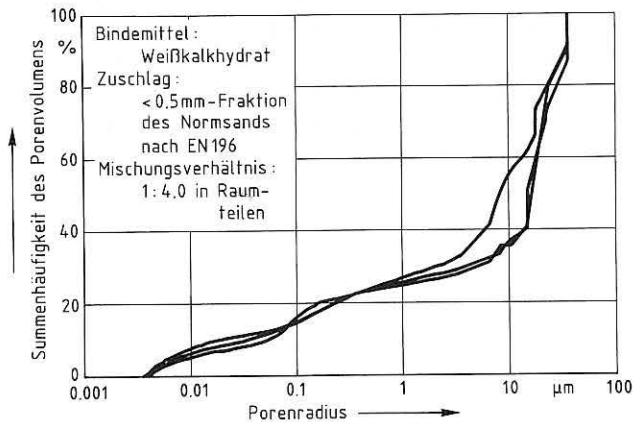


Bild 55: Vergleich der Porengrößenverteilung von Kalkmörtelchargen gleicher Rezeptur

Nur bei strengem Einhalten der Verhältnisse, u.a. auch der Mischzeit, ist dies so gut wie im vorliegenden Fall zu erreichen. Erhöht man den Bindemittelanteil in einer Mischung, so verlagert sich das gesamte mit der Hg - Porosimetrie erfaßbare Porenspektrum des daraus entstehenden Festmörtels zu feineren Poren hin (*Bild 56*).

Der Feinanteil < 5 µm Durchmesser (=Mikroporosität) steigt dabei um etwa 5 % und der Median fällt von 12 µm auf 8 µm ab; gleichzeitig ist eine Vergrößerung des Porenvolumens zu erkennen. Der massebezogene Anmachwassergehalt beider Mörtel war dabei vergleichbar (21,3 % und 21,6 %). Da an der Mehrzahl der Proben aufgrund der geometrischen Unzulänglichkeiten eine Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten w_g nicht erfolgen konnte,

sind dazu nur eingeschränkte Aussagen möglich: Ein zunehmender Bindemittelanteil hat offensichtlich auch eine Erhöhung dieses Kennwerts zur Folge.

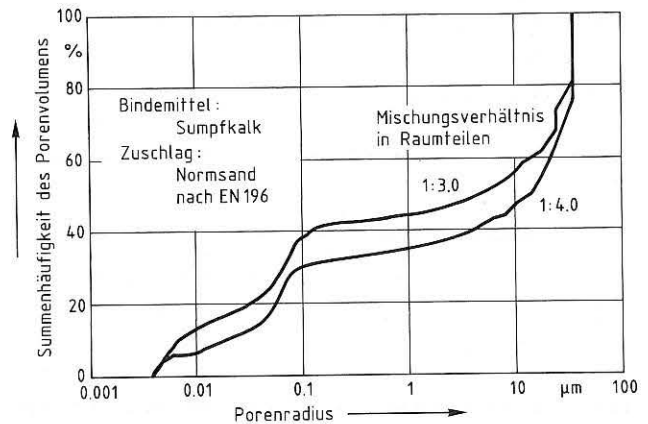


Bild 56: Verlagerung des Porengrößenspektrums von Kalkmörtel. Einfluß des Mischungsverhältnisses

Stellt man einen derartigen Mörtel, einem historischen mit dem Mischungsverhältnis von Kalkhydrat : Sand wie 1 : 0,9 (in Raumteilen) gegenüber, so tritt diese Tendenz noch deutlicher hervor (*Bild 57*). Bei der Interpretation ist jedoch Vorsicht angebracht, da für dessen Herstellung wahrscheinlich andere Techniken Anwendung fanden, z.B. Einsumpfen von Stückkalk zusammen mit dem Sand, und auch andere Anmachwassergehalte, als bei den Vergleichsproben zum Einsatz kamen. Man kann jedoch eine dem historischen Material ähnliche Porengrößenverteilung erzielen, wenn man dem Bindemittel eine geringe Menge Portlandzement hinzufügt (siehe ebenfalls *Bild 57*).

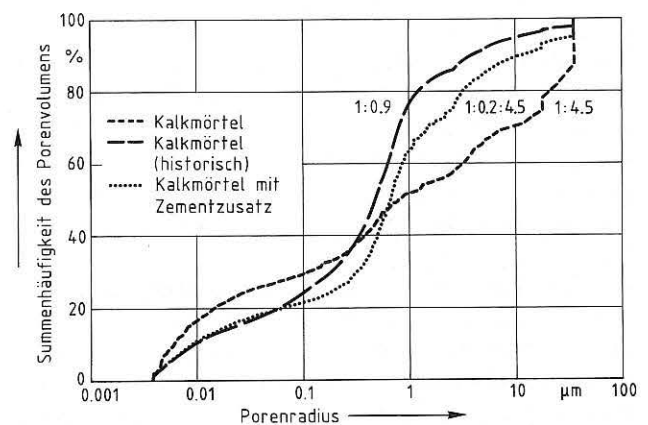


Bild 57: Verlagerung des Porengrößenspektrums von Kalkmörtel. Einfluß des Mischungsverhältnisses und eines Portlandzementzusatzes

Da ein geeigneter Mörtel aber noch andere Kriterien als nur das vorgenannte erfüllen muß, nämlich solche wie vergleichbares Porenvolumen, geringer E-Modul, möglichst kleiner Anteil an wasserlöslichen Salzen und eine Erhärtung, die im trockenen wie feuchten Milieu gleich gut ablaufen soll, scheidet ein zementhaltiger Mörtel aus, zumindest wenn Kalk im historischen Material als Binde-

mittel Verwendung gefunden hat. Um ein ähnliches Verhalten und Gefüge zu erzielen und dabei noch einen Mörtel zu produzieren, der frei von Rissen ist und auch bleibt, kommt man wohl nicht um das Wiederbeleben von alten Techniken herum.

Zum Einfluß der Kornzusammensetzung des Zuschlags auf physikalisch-technische Eigenschaften und Merkmale liegen ebenfalls erste Ergebnisse vor. Verwendung hierfür fanden Mörtel mit gleichem Mischungsverhältnis von 1 : 4,0 in Raumteilen, die natürlich hinsichtlich der Bindemittel- bzw. Zuschlagmassen aufgrund des Einsatzes von Normsand oder dessen Fraktion $\leq 0,5$ mm Durchmesser erheblich differierten. Die Konsistenz wurde über das Ausbreitmaß eingestellt (18 cm wurden gewählt), was dazu führte, daß der mit Feinsand hergestellte Mörtel etwa 1/3 mehr Anmachwasser, nämlich ca. 29 % anstatt 18 % benötigte. In Bild 58 ist die jeweilige Porengrößenverteilung der entsprechenden Proben dargestellt. Die Porenvolumina sind wiederum gleich 100 % gesetzt worden. Wider Erwarten weist der mit feinem Sand angesetzte Mörtel einen wesentlich geringeren Anteil an Mikroporen auf, nämlich 28 % gegenüber 55 %. Besonders hervorheben muß man auch das nahezu doppelt so hohe Poren

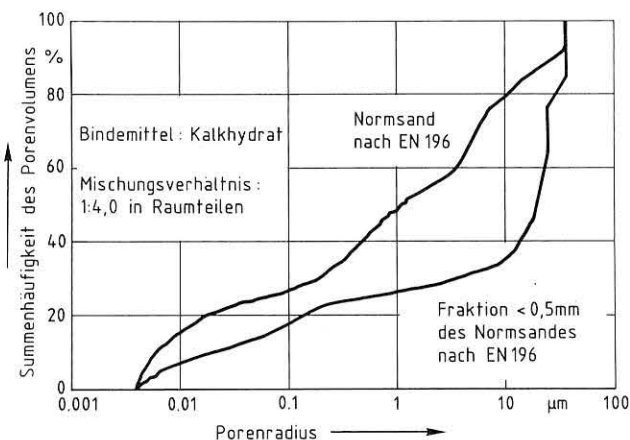


Bild 58: Verlagerung des Porengrößenspektrums: Einfluß der Korngröße der Sandevolumen, weil

es bei dieser Darstellungsart nicht zu erkennen ist. Hier liegt ein den Sanden analoges Verhalten vor, wo sich ebenso das Porenvolumen - ausgedrückt durch die Porosität - der Porenfüllungsgrad und folglich der Wasseraufnahmekoeffizient mit dem Feinerwerden der Fraktion erhöhten. Bedeutet dies nun, daß man die Verhältnisse bei Sanden geradewegs auf Mörtel übertragen kann? Ganz so einfach scheint es nicht zu sein, denn ähnlich wie der Korngrößeneffekt zieht eine Erhöhung des Anmachwassergehalts eine Zunahme von w_0 des entsprechenden Festmörtels nach sich. Daraus kann geschlossen werden, daß beide Parameter zusammen die beobachteten erheblichen Gefügeveränderungen hervorrufen und nur systematische Untersuchungen helfen, ihren Beitrag zum Gesamtgeschehen zu quantifizieren.

Weitere interessante Gesetzmäßigkeiten lassen sich durch Verknüpfung einzelner Kennwerte verdeutlichen. Aufgrund des Fehlens von genügend Daten, sollen nur Tendenzen, die allerdings für beide Körnungsarten als Zuschlag gelten, wiedergegeben werden. Vorhandene Lücken müssen noch geschlossen werden. Bei den erwähnten Kalkmörteln geht stets ein größeres Porenvolumen mit einem geringeren Anteil Mikroporen einher. Je weniger davon jedoch vorhanden sind, oder umgekehrt ausgedrückt, je mehr grobe Poren das Material aufweist, desto höhere Werte erreicht der Wasseraufnahmekoeffizient. Das bedeutet, daß die Mikroporosität möglicherweise zwar Aussagen über die Frostempfindlichkeit eines Baustoffs, jedoch nur untergeordnet solche zum Kapillargeschehen erlaubt. Nach Weber et al. [91] soll bei einem Durchmesser von $0,08 \mu\text{m}$ der Kapillartransport vollständig zum Erliegen kommen. Weiterhin beeinflusst wird natürlich die Verhaltensweise eines derartigen Mörtels durch den Putzgrund, auf den er aufgetragen worden ist, bzw. die Ziegel oder die Natursteine, zwischen denen er sich befindet. Deren Wasseraufnahme übt noch einen zusätzlichen Effekt auf den im Zuge der Erhärtung austrocknenden Mörtel und dessen Gefügeentwicklung aus. In Bild 59 sind deshalb exemplarisch die Wasserspannungen von Sand, daraus hergestelltem Kalkmörtel und typischer Ziegel von unterschiedlicher Rohdichte zu sehen, um zu verdeutlichen, daß man weder den Mörtel isoliert betrachten, noch das komplexe Geschehen bis zu seinem gegenwärtigen Zustand aus dem Auge verlieren darf.

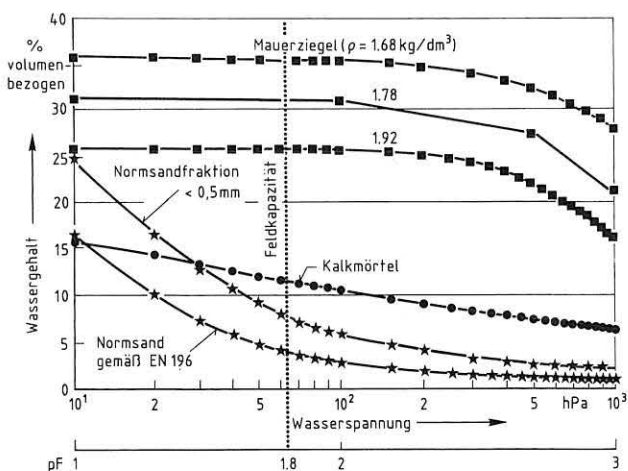


Bild 59: Wasserspannungsabhängiger Wassergehalt von trocken-gepreßten Mauerziegeln, einem Kalkmörtel und zweier Sande

5.6.3 Mauerausschnitte

Obwohl unterdessen einige Korrelationen zwischen porenraumbezogenen Merkmalen für Ziegel, Mörtelprismen, Putzmörtelbruchstücke und Schüttungen von Zuschlagssand vorliegen, kann ein Gesamtbild für das Kapillar- und Verdunstungsverhalten schließlich nur vom Mauerwerk selbst geliefert werden, bei dem das regelmäßig aufgestapelte Ziegelhaufwerk von einem geometrisch komplizierten Gerüst an Lager- und Stoßfugen durchzogen wird. So stellen die derzeitigen Befunde erste Schritte im Sinne der beabsichtigten Forschung dar. Durch zielgerichtete Variation der Versuchsbedingungen ließe sich die durch eine solche Aktion notwendigerweise explodierende Probekörperanzahl bzw. Versuchsdauer merklich eindämmen. Daher muß man nicht nur eine sorgfältige Auswahl treffen, sondern auch berücksichtigen, daß präparative Unwägbarkeiten die Signifikanz der erhaltenen Ergebnisse zunächst einschränken können. Nichtsdestoweniger stünde eine Ausweitung entsprechender Aktivitäten jedenfalls ganz im Interesse der Autoren. Nach Berücksichtigung der Verhältnisse bei Sanden und Mörteln kann man also durch Einbeziehen der Ziegel Aufschluß zum Transportgeschehen in einem ganzen Mauerwerk erhalten. Solch ein in Hinblick auf seine Porenmerkmale befriedigend gekennzeichnetes keramisches Material zeigt neben den durch die Brennbedingungen verursachten Eigenheiten, wie Abnahme des Porenvolumens bzw. Erhöhung der Rohdichte mit zunehmender Brenntemperatur, gleichermaßen eine Abnahme des Feinporenanteils infolge von Sintervorgängen. Dementsprechend verhält sich der mit der Dichte geringer werdende Wasseraufnahmekoeffizient w_0 (Bild 60). Der Verlauf der Kurve stellt eine Art Hyperbel dar. Für deren Darstellung standen 381 Werte zur Verfügung. Da w_0 auch mit zunehmendem Anteil an Mikroporen ansteigt,

bedeutet dies, daß bei vergleichbarem Porenvolumen ein hoher Mikroporenanteil die kapillare Wasseraufnahme des Ziegelscherbens fördert. Andererseits hat ein geringer Anteil an Mikroporen am Gesamtporenvolumen eine höhere spezifische Gasdurchlässigkeit zur Folge. Für Interessenten an weiteren Einzelheiten sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. [66] sowie [68]). Was die Versuchsbedingungen bei Mauerausschnitten anbetrifft, so sind diese nicht gerade übersichtlich, weshalb die schematische Darstellung in den folgenden Diagrammen zu einem besseren Verständnis beitragen soll.

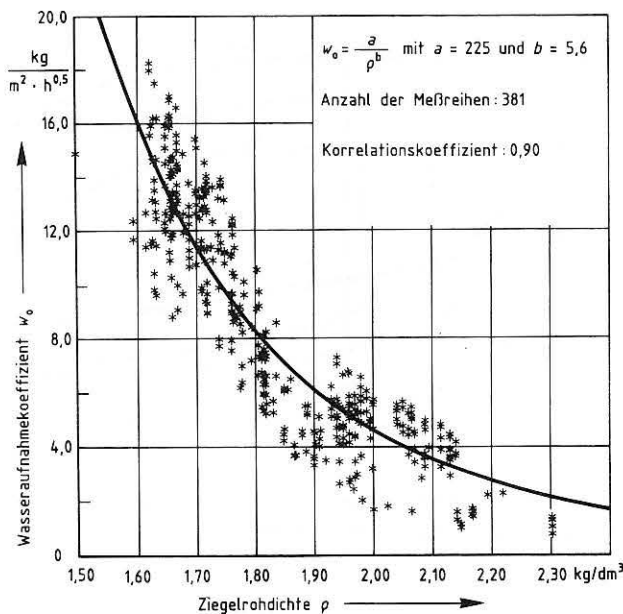
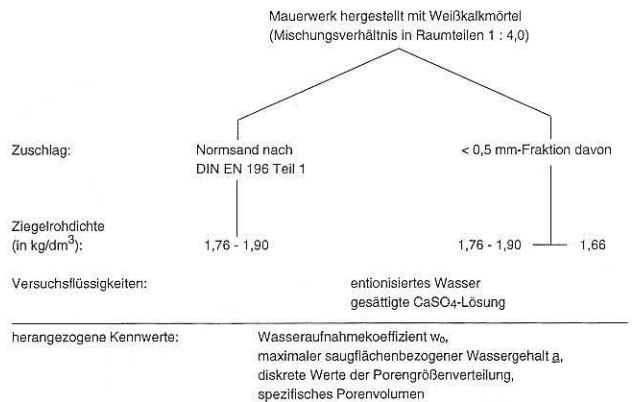
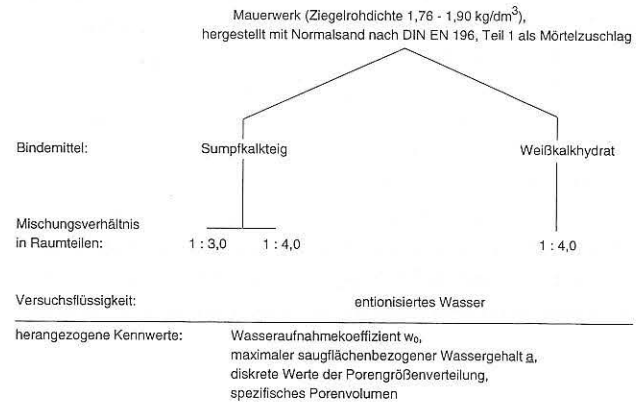


Bild 60: Wasseraufnahmekoeffizient w_0 als Funktion der Rohdichte, bestimmt an Ziegelstapeln gleicher Rohdichte (der am weitesten links befindliche Wert repräsentiert einen Gasbeton)

Zu deren Herstellung fanden trockengepreßte Vormauerziegel ähnlicher Produktion Verwendung. Reiner Kalkmörtel mit einem Mischungsverhältnis von Kalkhydrat zu Sand wie 1 : 4,0 in Raumteilen wurde eingesetzt, um eine kaum überprüfbare Sperrwirkung, z.B. durch Zementschlämme an den Grenzflächen der Ziegel, von vornherein auszuschalten. Als Zuschlag diente Normsand gemäß DIN EN 196 Teil 1 bzw. davon ein Siebdurchgang < 0,5 mm, womit man das Saugverhalten des Mörtels an das des Ziegels nahezu angleichen kann. Bei zwei Mauerausschnitten wurde auch Sumpfkalk als Bindemittel eingesetzt. Ferner variierte man in einzelnen Fällen das Mischungsverhältnis des Mörtels sowie die Rohdichte der Ziegel. Die Einstellung der Konsistenz erfolgte anhand des Ausbreitmaßes gemäß DIN 1060 Teil 102 [8]. Die Versuchskörper mit den Abmessungen 63 cm x 36 cm x 112 cm (Länge x Breite x Höhe) standen in Wannen auf Waagen, mit deren Hilfe sich die Masseänderung beim Saug- und Verdunstungsvorgang verfolgen ließ.

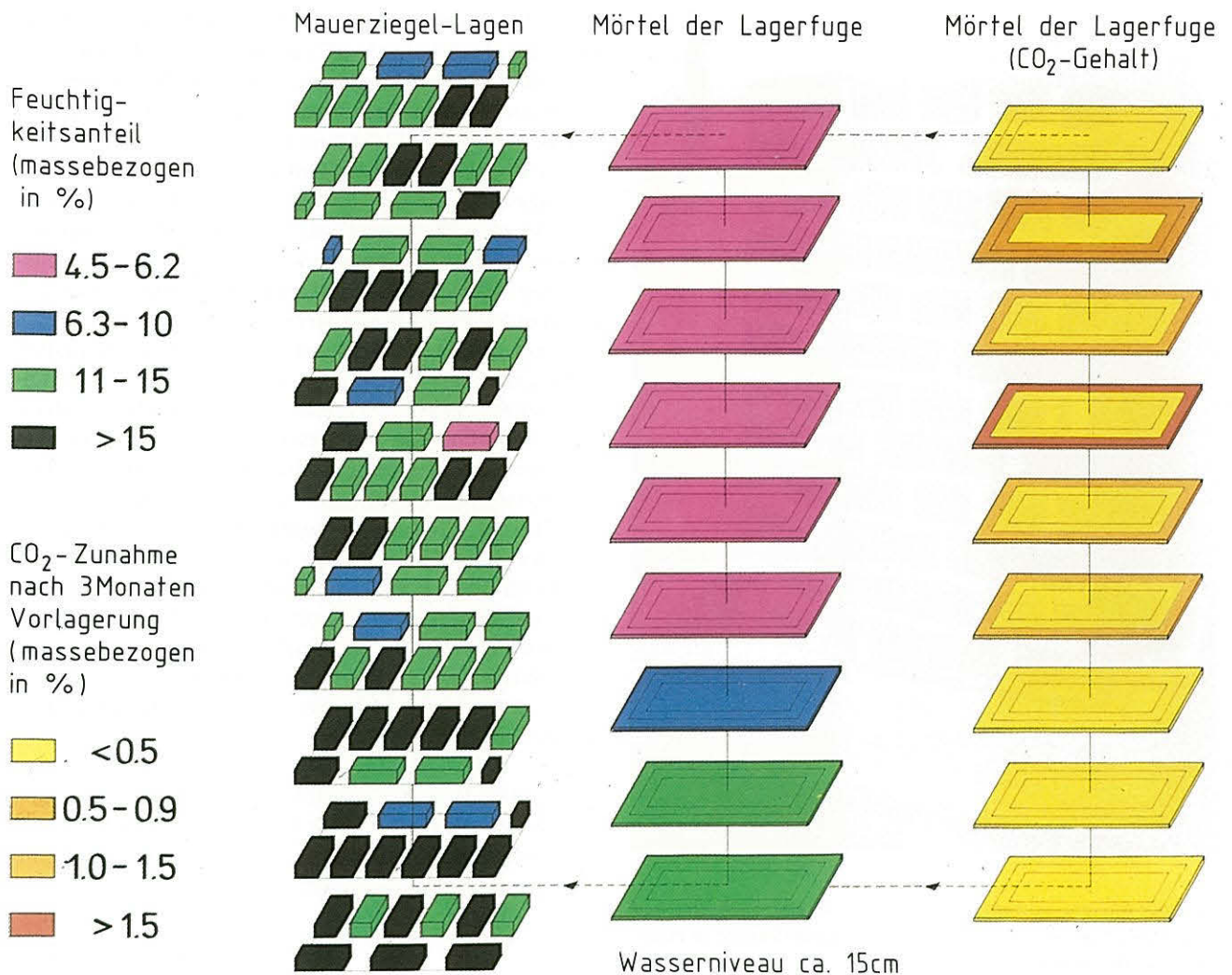


Bild 61: Explodierte Ansicht eines 2 Jahre alten, in konstantem Klima befindlichen Mauerwerksausschnitts ohne Nachbehandlung: Feuchtigkeits- und Carbonatverteilung

Als explodierte Ansicht ist die Feuchtigkeitsverteilung in einem so hergestellten Mauerausschnitt zu erkennen (Bild 61). Die Durchfeuchtung hat hier sogar die oberste Ziegellage erfaßt. Die Carbonatisierung der Mörtelfugen ist jedoch noch ungleichmäßig. Begonnen wurden die Versuche nach einer etwa 1 Jahr dauernden Vorbehandlung - entsprechend einer periodischen Befeuchtung - mit dem Ziel einer möglichst gleichmäßigen Carbonatisierung.

Bild 62 zeigt die Versuchseinrichtung zur Ermittlung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme und des Verdunstungsverhaltens von Mauerausschnitten. Innerhalb des in bezug auf Material - und demzufolge ebenso Wasserspannung aber auch Morphologie der Verdunstungsfläche - als ein System von zwei Komponenten anzusprechenden trockenen Mauerwerks herrscht bei Zuführung der Versuchsflüssigkeit von unten zwischen beiden ein ständiger Aus-

tausch von Wasser. Natürlich hängt dies davon ab, ob Ziegel oder Mörtel die Feuchtigkeit besser leiten d. h. schneller bzw. mit größerem Durchfluß über die Querschnittsfläche zu transportieren vermögen. Darüber hinaus ist deren Beitrag maßgeblich vom jeweiligen Volumenanteil - hier ca. 20 % für den Mörtel - abhängig.

Von Interesse war zunächst das Mischungsverhältnis und sein Einfluß auf das Kapillarverhalten des Mauerwerks. Mit dem Zuschlag Normsand und dem Bindemittel Sumpfkalk wurden Mischungen im Verhältnis 1 : 4,0 bzw. 1 : 3,0 in Raumteilen hergestellt. Der Wasserbedarf der Frischmörtel betrug 21,8 % bzw. 20,6 %, war also vergleichbar. In den Wasseraufnahmekurven für die entsprechenden Mauerausschnitte trat die Beteiligung des Mörtels am Gesamtgeschehen deutlich zutage (Bild 63). Die fettere Mischung führt zu erhöhtem Feuchtigkeitsaufstieg.

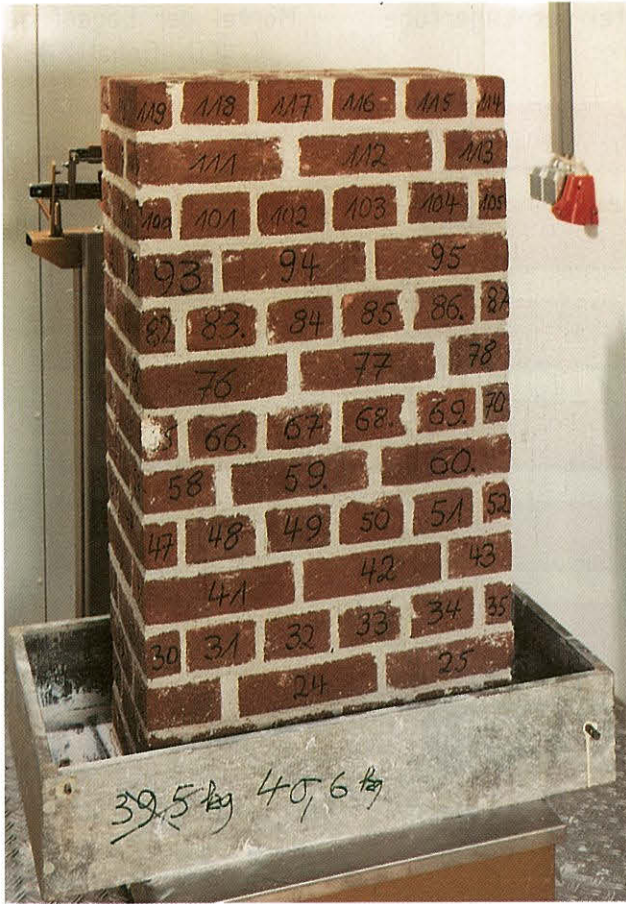


Bild 62: Mauerausschnitt für Versuche zu Kapillarverhalten und Feuchtigkeitsabgabe, plziert auf der Wägeeinrichtung in einem Trog für die Feuchtigkeitszufuhr

Auch der Wasseraufnahmekoeffizient steigt geringfügig von 5,6 auf 6,5 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ an, wofür der schon bei vergleichbaren Mörtelprismen festgestellte höhere Feinporenanteil sowie das größere Porenvolumen verantwortlich zu machen sind. Verwendet man anstelle des Sumpfkalks industriell gelöschtes Weißkalkhydrat bei gleichem Mischungsverhältnis von 1 : 4,0 und ähnlichem Wasserbedarf, so zeigt Mauerwerk mit diesem Mörtel jedoch bei vergleichbarem w_0 einen merklich höheren Feuchtigkeitsaufstieg. Mörtel mit derartigem Bindemittel weisen gegenüber Sumpfkalk ein höheres Porenvolumen und einen größeren Feinporenanteil auf, wodurch dieses Verhalten seine Erklärung findet. Jede Veränderung einer Mörtelzusammensetzung verursacht demnach auch eine deutliche Beeinflussung des Gesamtverhaltens. Erhöht man bei gleichem Mischungsverhältnis unter Einsatz einer Normsandfraktion von $< 0,5$ mm die Ziegelrohddichte von ca. 1,66 auf 1,76 bis 1,90 kg/dm^3 , führt dies zum Absinken der Steighöhe bzw. des ihr praktisch äquivalenten Werts für die maximale flächenbezogene Wasseraufnahme einer Materialsäule a von ca. 200 auf ca. 185 kg/m^2 , und auch der Wasseraufnahmekoeffizient w_0 zeigt geringere Werte (ca. 8 gegenüber 12 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$). Derart läßt sich auch der Beitrag der Ziegel zum Wasseraufstieg quantifizieren.

So wie die Kornzusammensetzung der Mörtelsande einen erheblichen Einfluß auf das Porengefüge ausübt, zeigen zwangsläufig auch damit hergestellte Mauerausschnitte ein entsprechendes Verhalten.

Kurve 1 mit $a = 62.3$ $b = 0.0749$	Kurve 2 mit $a = 79.4$ $b = 0.0707$	Kurve 3 mit $a = 119.1$ $b = 0.0387$
Best.maß = 0.999	Best.maß = 0.996	Best.maß = 0.998
mittl. Abw. = 0.5	mittl. Abw. = 1.3	mittl. Abw. = 1.2

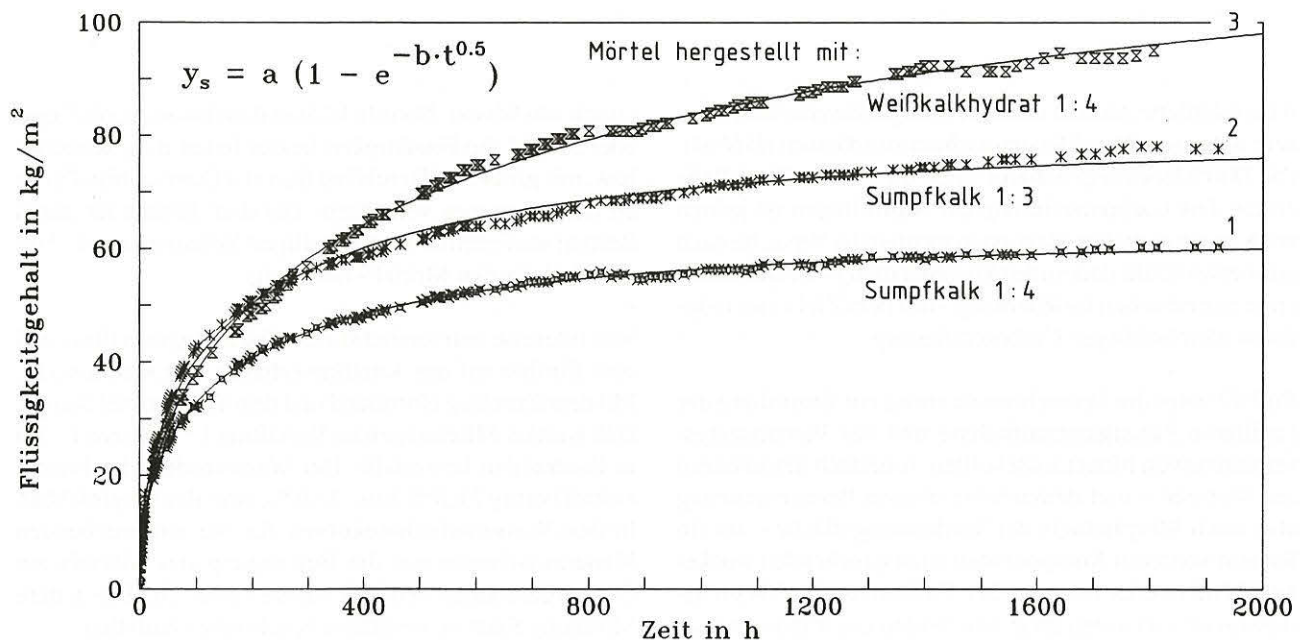


Bild 63: Kapillarer Flüssigkeitsaufstieg in Mauerwerk (Ziegelrohddichte 1,76 - 1,90 kg/dm^3 , Normsand als Mörtelzuschlag): Einfluß des Mischungsverhältnisses und der Bindemittelart

Kurve 1 mit $a = 110.0$
 $b = 0.0380$
 Best.maß = 0.999
 mittl. Abw. = 0.7

Kurve 2 mit $a = 119.1$
 $b = 0.0387$
 Best.maß = 0.998
 mittl. Abw. = 1.2

Kurve 3 mit $a = 184.2$
 $b = 0.0493$
 Best.maß = 1.000
 mittl. Abw. = 0.9

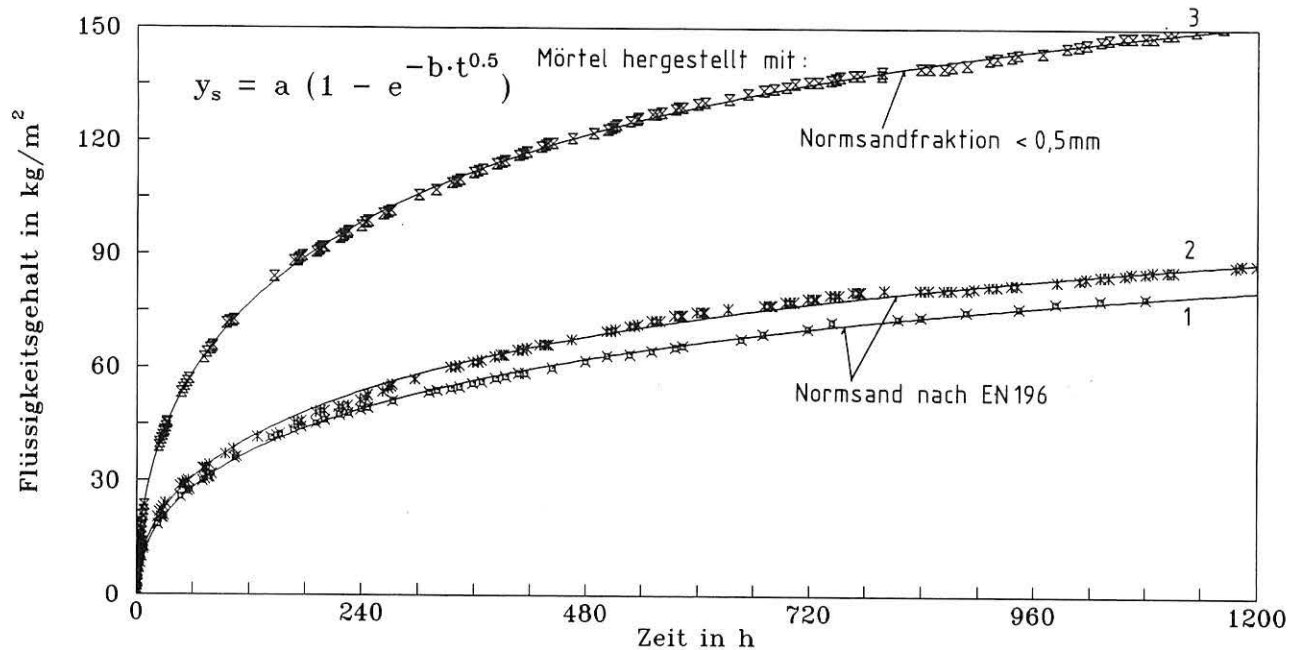


Bild 64: Intensivierung des kapillaren Flüssigkeitsaufstiegs in Mauerwerk bei Einsatz von Sand < 0,5 mm Durchmesser als Zuschlag für den Mörtel (Ziegelrohddichte 1.76 - 1.90 kg/dm³, Mischungsverhältnis 1 : 4,0)

Verwendet man Normsand der Körnung < 0,5 mm als Zuschlag, steigt die Feuchtigkeit wesentlich höher, was ebenfalls im a -Wert zum Ausdruck kommt (184 gegenüber 110 bzw. 119 kg/m² bei Verwendung von Normsand). Gleichsinnig vergrößert sich w_0 von ca. 4 auf 9 kg/(m² · h^{0.5}) (siehe Bild 64). An Ziegeln ist nachgewiesen worden, daß a etwa bei Anwesenheit von Calcium- bzw. Natrium-

sulfatlösungen ansteigt, was man mit deren Oberflächenspannung erklären kann. Vergleichbares geschieht bei Mauerauschnitten mit Feinsand < 0,5 mm als Zuschlag, wo sich a von ca. 200 bzw. 217 auf ca. 272 bzw. 281 kg/m² erhöht, wenn man eine gesättigte Gipslösung für den Versuch heranzieht (Bild 65).

Kurve 1 mit $a = 199,7$ und $b = 0,049$
 Kurve 2 mit $a = 217,1$ und $b = 0,058$

Kurve 3 mit $a = 271,7$ und $b = 0,039$
 Kurve 4 mit $a = 280,7$ und $b = 0,043$

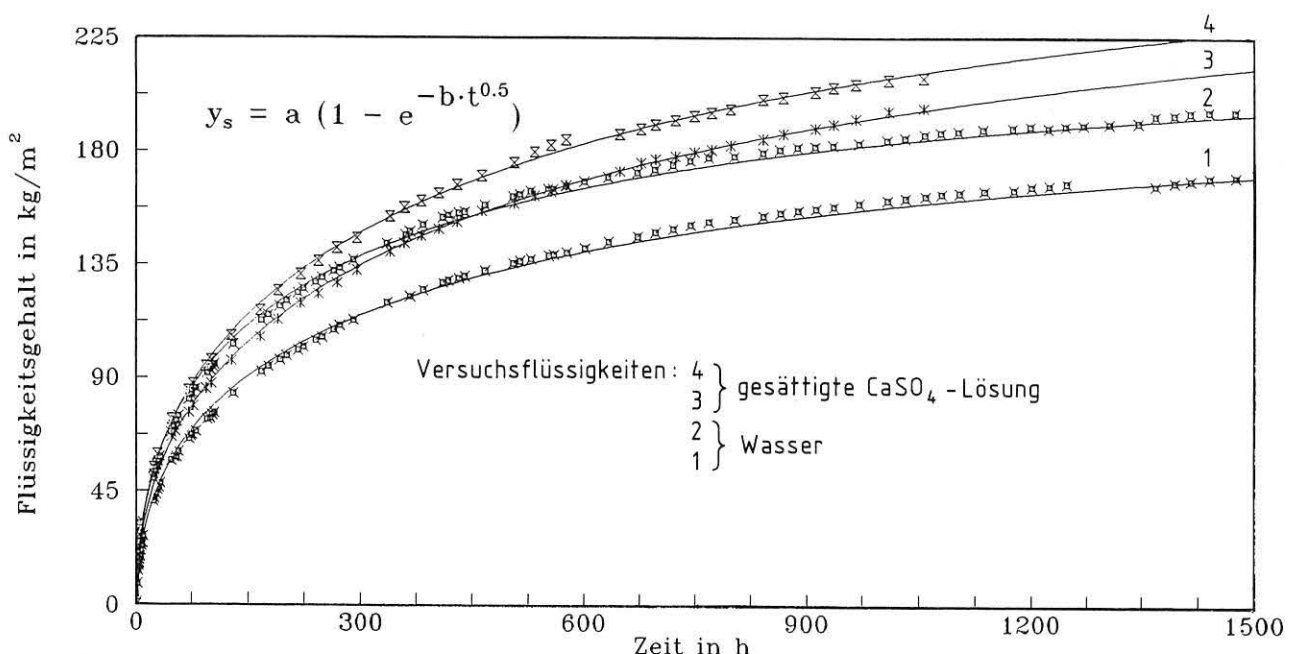


Bild 65: Vergrößerung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme von Mauerwerk bei Verwendung von gesättigter Calciumsulfatlösung anstelle von Wasser (Ziegelrohddichte 1,66 kg/dm³, Zuschlagsand < 0,5 mm, Mischungsverhältnis 1 : 4,0)

Der Wasseraufnahmekoeffizient bleibt hier bei einem mittleren Wert von 11,2 bzw. 11,3 kg/(m² · h^{0,5}) für jeweils zwei Versuche nahezu gleich. Dies ist für einen echten Materialkennwert auch nicht anders zu erwarten. Der Mörtel mit Normsand verhält sich anders. Die Feuchtigkeitsaufnahme sinkt gegenüber dem Versuch mit Wasser von 119 auf 102 kg/m², aber auch w_0 zeigt etwas kleinere Beträge (3,9 gegenüber 4,6 kg/(m² · h^{0,5})). Das aber bedeutet zwangsläufig eine Veränderung des Mörtelgefüges. Nach den mit der Hg-Porosimetrie erhaltenen Ergebnissen gibt die Gipslösung offenbar zu einer deutlichen Verkleinerung des spezifischen Porenvolumens von 0,117 auf 0,108 cm³/g bei nahezu gleichbleibender Porengrößenverteilung Anlaß. Wiederholt man den Tränkungsverfahren mit Gipslösung mehrmals, so führt das zur immer weiteren Verringerung von a und w_0 , wahrscheinlich aufgrund einer weiteren Veränderung des Porengefüges. Wegen ihres hohen Anteils an Poren mit einem Durchmesser von > 5 µm (82 % gegenüber 45 %) tritt ein derartiges Verhalten in Mörteln mit Feinsand nicht auf.

Neben der Flüssigkeitsaufnahme stellt natürlich auch die Flüssigkeitsabgabe im Zuge des Verdunstungsprozesses ein wichtiges Verhaltensspezifikum dar. Nach Einstellen eines Gleichgewichtszustands am Ende des Saugversuchs wird aus den Wannen, in denen die Ausschnitte stehen, die Versuchsflüssigkeit abgelassen und der Verdunstungsverlauf - bezogen auf die visuell erkennbare Durchfeuchtungsfläche - gravimetrisch verfolgt. Ca. 20 % davon entfallen auf die Oberfläche des Mörtels. Trocknet der bis zu

einer bestimmten Steighöhe mit Wasser getränkte Mauer-ausschnitt, so spielen zunächst der Kapillartransport wie später auch die Diffusion im Zusammenhang mit der Immobilisierung der gelösten Salze eine Rolle. Die für eine Beschreibung dieses Prozesses herangezogene Anpassungsfunktion lautet

$$y_e = a \cdot e^{-\frac{b}{a} \cdot t^c} \quad [40], [66], [95]$$

und hat sich über Versuchszeiten bis zu drei Jahren bewährt, kann aber hinsichtlich der Bedeutung ihrer Parameter noch nicht vollständig interpretiert werden. Beiläufig ist zu erwähnen, daß anstelle der Quotienten b/a früher nur b gestanden hat [89]. Der Wert a entspricht hierbei dem auf die Verdunstungsfläche bezogenen Feuchtigkeitsgehalt, während c nach ersten Ergebnissen vom Materialtyp und dem Umgebungsklima abhängt. Vergleicht man die beiden Mauerausschnitte miteinander, für deren Mörtel Sumpfkalk als Bindemittel verwendet worden ist (Bild 66), so kann man einen nahezu parallelen Kurvenverlauf feststellen, wobei der mit fetterer Mischung (Kurve 3) stets oberhalb der anderen, mehr Zuschlag enthaltenden liegt (Kurve 2). Dies gilt auch dann, wenn man die Lage ihrer Startpunkte gleich 100 % setzt. Industriell gelöschtes Weißkalkhydrat verhält sich bei vergleichbarem Mischungsverhältnis etwas anders (Kurve 1). Sowohl nach 500 und 1000 wie auch nach 2500 h verbleibt nämlich im Mauerwerk ein geringerer, auf die Verdunstungsfläche bezogener Wassergehalt als in seinem mit Sumpfkalk hergestellten Äquivalent.

Kurve 1 mit $a = 12.3$
 $b = 0.002422$
 $c = 1.239$
 Best.maß = 0.999
 mittl. Abw. = 0.1

Kurve 2 mit $a = 15.7$
 $b = 0.004929$
 $c = 1.191$
 Best.maß = 0.999
 mittl. Abw. = 0.2

Kurve 3 mit $a = 17.2$
 $b = 0.005471$
 $c = 1.169$
 Best.maß = 0.999
 mittl. Abw. = 0.1

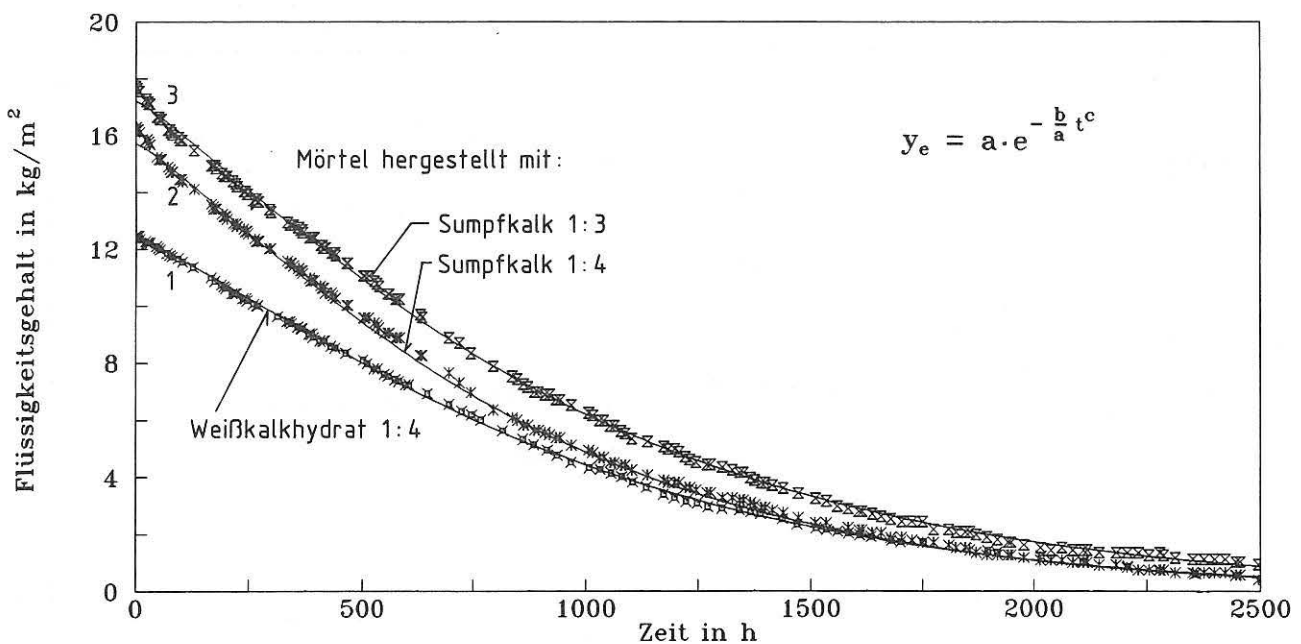


Bild 66: Verdunstungsverhalten von Mauerwerk (Ziegelrohddichte 1.76 - 1.90 kg/dm³, Normsand als Mörtelzuschlag): Einfluß des Mischungsverhältnisses und der Bindemittelart

Was den Einfluß der Ziegelrohddichte anbetrifft, so erhält man aufgrund der unterschiedlichen Verdunstungsflächen, die im Falle der dichteren Ziegel kleiner sind, Kurven mit verschiedenen Startpunkten (Bild 67), was einen Vergleich erschwert. Betrachtet man den Kurvenanstieg bis zu etwa 750 Stunden (ca. 31 Tage), so ist ein Parallellauf festzustellen, was auf eine etwa gleiche Verdunstungsgeschwindigkeit bis zu diesem Zeitpunkt hindeutet. Dies kann nicht verwundern, denn es hängt im ersten Abschnitt des Trocknungsvorgangs, der durch kapillaren Flüssigkeitstransport aus dem Innern an die Oberfläche des Probekörpers gekennzeichnet ist, die verdunstende Wassermenge nur von den äußeren Bedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab [49]. Deshalb ist in diesem Bereich jeweils die Verdunstungsgeschwindigkeit gleich. Setzt man jedoch die Startpunkte der Kurven (ca. 14 kg/m² gegenüber 23 kg/m²) gleich 100 %, so weist der Mauerausschnitt mit Ziegeln geringerer Dichte zu jedem Zeitpunkt einen höheren prozentualen, flächenbezogenen Wassergehalt *a* auf, oder mit anderen Worten: Das Material mit der höchsten Flüssigkeitsaufnahme erreicht demzufolge auch erst nach längerer Zeit den Endzustand bzw. seinen Ausgleichsfeuchtigkeitsgehalt, was eigentlich zu erwarten gewesen ist. Führt man derartige Versuche mit gesättigter Gipslösung anstelle von Wasser durch, hat dies aufgrund des höheren Feuchtigkeitsaufstiegs resp. einer größeren Verdunstungsfläche auch hier Kurven mit unterschiedlichen Ausgangspunkten zur Folge. Obwohl bei Kapillaritätsversuchen an Mauerwerk mit Sand < 0,5 mm unter Einsatz einer Gipslösung trotz größerer Steighöhe der gleiche Wasseraufnahmekoeffizient - entsprechend einem unverändertem Gefüge - vorliegt, wird das Verdunstungsverhalten dadurch beeinflusst, daß der flächenbezogene Masseverlust sich erheblich verlangsamt. Während bei Wasser der Ausgleichsfeuchtigkeitsgehalt von etwa 0,2 kg/m² im

Falle von dichten Ziegeln (Kurve 1) nach etwa 2500 Stunden erreicht ist, weist nach der gleichen Zeit das mit Gipslösung behandelte Vergleichsmauerwerk (Kurve 2) noch beinahe 3 kg/m² auf, was etwa 20 % der Ausgangsfeuchtigkeit entspricht. Bei Ziegeln geringerer Dichte liegen mit Wasser nach vergleichbarer Verdunstungszeit noch 13,5 % der Ausgangsfeuchtigkeit und mit Gipslösung sogar ca. 46 % vor, was bedeutet, daß bei wenig dichten Ziegeln der Einfluß der Art der Lösung verstärkt wirksam wird.

Eine Verlagerung des Korngrößenspektrums zu kleineren Durchmessern hin führt zu einem höheren Wasseraufstieg, damit einer größeren Verdunstungsfläche und einem erhöhten, darauf bezogenen Flüssigkeitsgehalt. Der Anstieg beider Verdunstungskurven ist jedoch unterschiedlich (Bild 68). Von 0 bis ca. 600 Stunden ist bei dem Mauerausschnitt mit Feinsand als Mörtelzuschlag (Kurve 3) eine Abnahme von 14 kg/m² auf etwa 7 kg/m² - also rund die Hälfte - zu beobachten, während die Verdunstungsrate im selben Zeitraum bei Verwendung von Normsand (Kurve 1) nur von 10 kg/m² auf ca. 7 kg/m², absinkt. Setzt man die 14 kg/m² bzw. 10 kg/m² zu Beginn der Versuche wiederum gleich 100 % und betrachtet dann die darauf bezogene jeweilige Masseabnahme, so ist diese bei letztgenanntem Mörtel stets geringer. Denn er weist nach 500 Stunden noch 70 % (gegenüber ca. 50 %) und nach 1000 Stunden noch 43 % (gegenüber ca. 25 %) des ursprünglichen Flüssigkeitsgehalts auf, weshalb auch entsprechend später der Trockenzustand erreicht wird. Ähnliche Ergebnisse erhält man, wenn zur Erklärung die Kurve 2 herangezogen wird. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß ein Mauerwerk mit Feinsandmörtel bei sonst gleichem Ziegelmaterial trotz der höheren Wasseraufnahme seine Feuchtigkeit wesentlich schneller abgibt als eines mit Normsandmörtel.

Kurve 1 mit $a = 14,6$, $b = 0,0078$ und $c = 1,13$

Kurve 2 mit $a = 15,2$, $b = 0,0013$ und $c = 1,27$

Kurve 3 mit $a = 23,0$, $b = 0,0028$ und $c = 1,28$

Kurve 4 mit $a = 25,0$, $b = 0,0007$ und $c = 1,32$

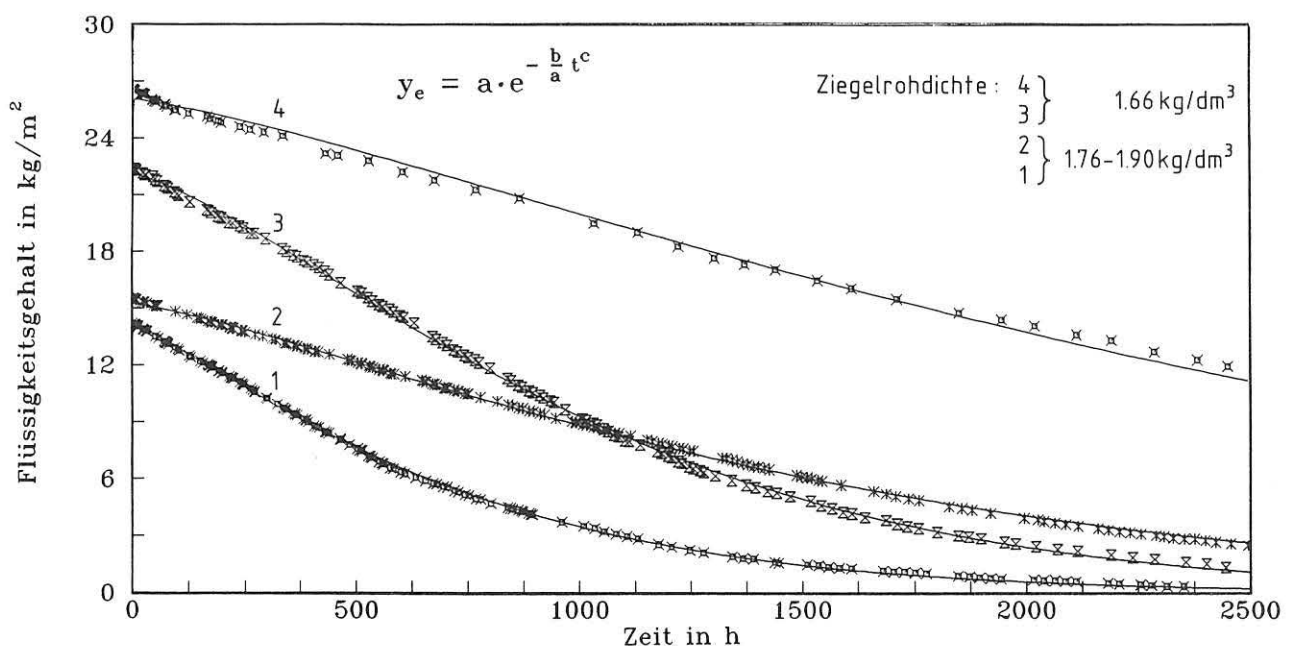


Bild 67: Veränderung des Verdunstungsverhaltens von Mauerwerk durch Verwendung von Ziegeln unterschiedlicher Rohddichte von gesättigter Calciumsulfatlösung (Kurven 2 und 4) anstelle von Wasser (Mörtelsand < 0,5 mm Durchmesser, Mischungsverhältnis 1 : 4,0)

Kurve 1 mit $a = 10.4$
 $b = 0.0016$
 $c = 1.240$
 Best.maß = 0.998
 mittl. Abw. = 0.2

Kurve 2 mit $a = 12.3$
 $b = 0.0024$
 $c = 1.239$
 Best.maß = 0.999
 mittl. Abw. = 0.1

Kurve 3 mit $a = 14.6$
 $b = 0.0077$
 $c = 1.131$
 Best.maß = 0.999
 mittl. Abw. = 0.1

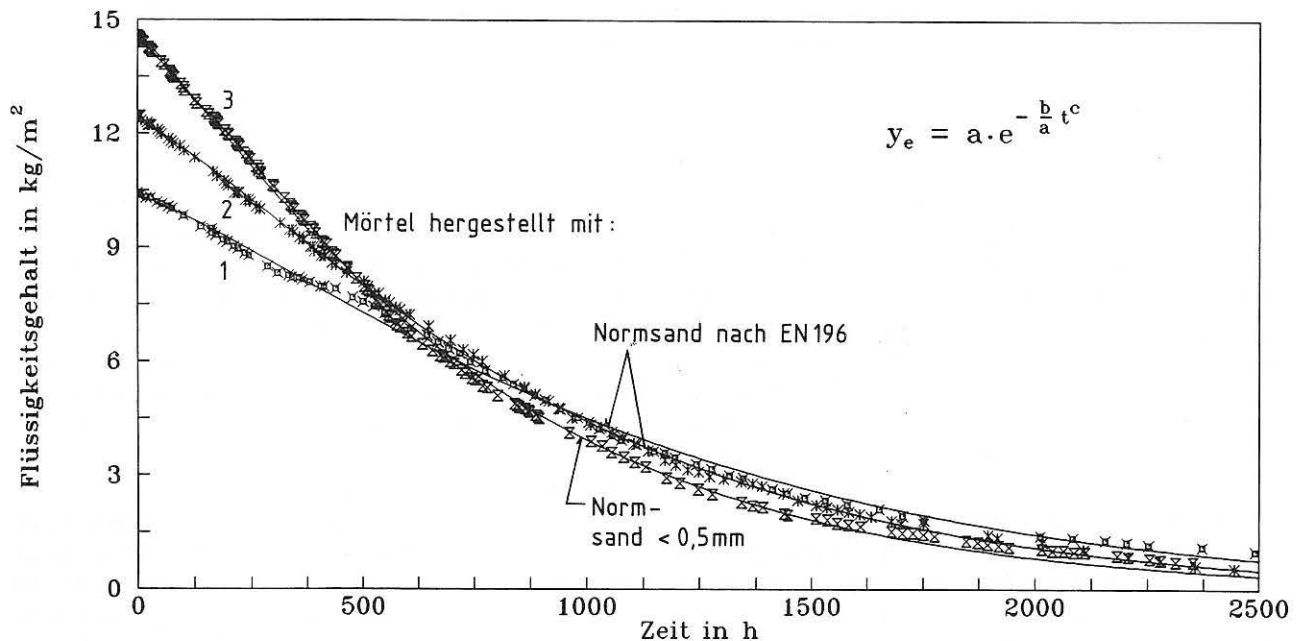


Bild 68: Verdunstungsverhalten von Mauerwerk (Ziegelrohddichte 1.76 - 1.90 kg/dm³, Mischungsverhältnis 1 : 4,0): Einfluß der Korngrößenverteilung der verwendeten Mörtelsande

Daraus kann man folgern, daß das große Porenvolumen und der hohe Anteil an kapillaraktiven Poren > 5 µm auch die Verdunstung positiv beeinflusst, d.h. sie beschleunigt. Da mit Normsand als Zuschlag bei Einsatz einer Gipslösung kaum Veränderungen im Kapillarverhalten eines Mauerwerks aufgetreten sind, verwundert es nur wenig, wenn dies auch während der Verdunstung nicht der Fall ist. Erst nach der dritten Wiederholung des Tränkungs Vorgangs ist eine Verlangsamung der Feuchtigkeitsabgabe gegenüber dem Versuch mit Wasser festzustellen. Auf die beträchtliche Beeinflussung der Verdunstung bei Feinsandmörteln nach jeweils nur einmaliger Behandlung mit einer derartigen Lösung ist schon in Bild 67 hingewiesen worden. Porengeometrie und Oberflächenspannung scheinen hieran beteiligt zu sein. Weitere Interpretationen sind z.Z. noch nicht möglich.

6 Zusammenfassung

Hauptziel des vom Umweltbundesamt (UBA) geförderten Vorhabens war es, Aussagen über Dosis/Wirkungs-Beziehungen bei verschiedenen Putzmörteln anhand von Auslagerungsversuchen zu gewinnen, und dies an sechs Standorten im Raum Berlin mit unterschiedlicher SO₂-Konzentration nach mehrjähriger Dauer. Dabei sollte die Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch Einhalten von definierten Zusammensetzungen (Normsand als Zuschlag und überwiegend Luftkalk als Bindemittel) sowie unter Einbeziehung der Meßstationen des Berliner Luftgütemeßnetzes sichergestellt werden. Abgesehen von einer chemischen

Analyse der im Verlauf der Exposition angereicherten wasserlöslichen Nebenbestandteile und Ermittlung ihres Phasenaufbaus in verschiedenen Tiefenlagen wurden einige im Zuge des Verwitterungsgeschehens relevante physikalisch-technische Eigenschaften und Merkmale untersucht. Zu ihrer Erfassung dienten u.a. auch verbesserte bzw. neuentwickelte Verfahren, die teilweise im kürzlich erschienenen Mörtelhandbuch [28] ihren Niederschlag fanden. In den Versuchszeitraum fiel die Wiedervereinigung Deutschlands, wodurch immissionsbedingte Materialveränderungen wegen verschärfter gesetzlicher Auflagen und sowieso schon abklingender Emissionen infolge Stilllegung von Industrien im mitteldeutschen Raum - also ausgerechnet in der vorherrschenden Einzugsrichtung - nur noch in stark vermindertem Umfang auftraten. Bei den auf besonders konstruierten Auslagerungsgestellen unmittelbar dem SO₂-Angriff, aber nicht dem direkten Regenfall ausgesetzten, jeweils gegen Süden orientierten und senkrecht, also wie am Bauwerk angeordneten, als Kratzputz ausgeführten Probestplatten konnte demnach in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht mit einem raschen Reaktionsfortschritt gerechnet werden.

Als Alternative erwies es sich zweckmäßig, für die Entnahme zwangsläufig die Zeitintervalle zu spreizen und den Schwerpunkt des Programms mehr auf Gebäudeproben zu verlagern, in denen sich die Ergebnisse einer längeren Beanspruchungsdauer aufsummiert fanden, wohl wissend, daß man hinsichtlich Homogenität und Vergleichbarkeit auch Nachteile in Kauf zu nehmen hatte. So wiederum reduzierte sich übrigens die Anzahl der brauchbaren, z.T. unter hohem Aufwand gewonnenen Mörtelbruchstücke.

Untersuchungen zu diesem Teil des Vorhabens legen nahe, daß im Hinblick auf SO_2 , die geputzte Bauwerksoberfläche ein und derselben Höhenlage, gleiche Standdauer vor - ausgesetzt, unabhängig von der Himmelsrichtung eine einheitliche Reaktionsfront darstellt, an der sich, bedingt durch das Mikroklima und infolge der Zyklen von Auflösung, Transport und Wiederausscheidung, erst nachträglich unterschiedliche Konzentrationsprofile entwickeln. Demgegenüber zeigen Nitrat und Chlorid eine deutliche Abhängigkeit von der Orientierung der Fassaden zur Emissionsquelle. Dadurch kommt es auch zu systematischen Veränderungen der mit Hilfe des Quecksilber-Druckporosimeters gewonnenen Gefügedaten sowie der Verschleißfestigkeit, wobei hier wahrscheinlich auch Sonneneinstrahlung, Temperaturwechsel und Taubildung verantwortlich gewesen sind. Wesentlich mehr Einfluß auf das Porensystem eines Materials gleichen Alters hat die Expositionshöhe. Mit zunehmendem Abstand vom Erdniveau ist bei einem Gebäude, dessen unterer Fassadenteil durch Baumbewuchs geschützt ist, ein merklicher Anstieg des Wasseraufnahmekoeffizienten und des mittels Hg-Porosimetrie erfaßten spezifischen Porenvolumens zu erkennen, und zwar in Form einer Verringerung des Anteils an groben und auch an feinen Poren. Dies führt zur Herausbildung eines bevorzugten Durchmessers zwischen 2 und 100 μm , was mit dem kapillaraktiven Bereich praktisch deckungsgleich ist. Verbunden damit kommt es zu einer Abnahme des Dampfdiffusionswiderstands. Wenn keine Vegetation vorhanden ist, wird - was die Porengrößenverteilung anbetrifft - ein nahezu gleichartiges Verhalten beobachtet. Abweichend von dem vorherbeschriebenen Fall nimmt hier der Sulfatgehalt mit der Höhenlage zu und der d_{10m} -Wert verlagert sich zu größeren Durchmessern. Möglicherweise spielen dabei Auslagerungsprozesse eine Rolle. Außerdem ist die Putzoberfläche an den oberen Gebäudeteilen sichtbar abgewittert gewesen, so daß für die Untersuchung nicht mehr die Originaloberfläche zur Verfügung gestanden hat. Auf diese Weise entsteht neben dem Bezug zur Himmelsrichtung eine Höhengliederung am Bauwerk, die sich in einer zunehmenden Verwitterungsintensität bei gleicher Expositionsdauer ausdrückt, was auch Verschleißmessungen bestätigen. So wird beispielsweise die Sulfatbildung von Menge und Chemismus des Bindemittels bestimmt, hängt aber weitgehend von der Lage am Bauwerk ab.

Von der Auslagerung her standen gegen Ende des Vorhabenszeitraums für die Untersuchung 1,5 Jahre alte Proben zur Verfügung, die erwartungsgemäß eine nur geringe Sulfataufnahme bis in etwa 1 mm Tiefe zeigten. Mit zunehmender Auslagerungszeit vergrößerten sich die Poren im Vergleich zu den unbewitterten Rückstellproben, wie übrigens auch eine Erhöhung des Wasseraufnahmekoeffizienten charakteristisch für die zeitabhängige Reaktion gegenüber den schwefeloxidischen Luftverunreinigungen war. Das gilt nicht für Material gleichen Alters, aber zunehmender SO_2 -Konzentration am Auslagerungs-ort. Hier tritt mit steigender Belastung eine Verkleinerung von w_0 bei gleichzeitiger Vergrößerung der Poren ein. Was das Verschleißverhalten anbetrifft, so sind bei den Kalkmörteln innerhalb dieses Zeitraums keine Veränderungen

der Gefügestärke eingetreten, wohl aber bei denen mit Zementzusatz und Dolomitmalkhydrat als Bindemittel, wofür lokale Besonderheiten wie z.B. höhere relative Luftfeuchte, verstärkte Taubildung aber auch Sprühnebel verantwortlich zu machen sind. Ebenso sind mit Hilfe dieses Verfahrens systematische Veränderungen in Richtung zu bzw. abnehmender SO_2 -Immission zu beobachten. Weitere Einblicke in die Verhältnisse gestatten Messungen der Depositionsgeschwindigkeit und der Aufnahme von Schwefeldioxid. Zementhaltige Produkte weisen im trockenen Zustand die höchsten Werte auf. Mit Sumpfkalk bereiteter Mörtel liefert dabei eine viermal höhere Absorptionsgeschwindigkeit und eine doppelt so hohe Aufnahme wie solcher mit industriell gelöschtem Weißkalkhydrat. Nach kapillarer Wassersättigung läßt sich in allen Materialtypen bei gleich langer Begasung ein ähnlicher Sulfatgehalt, jedoch im Hinblick auf die Geschwindigkeit in anderer Reihenfolge feststellen. Dies führt einmal mehr die herausragende Bedeutung der Expositionsbedingungen für den Verwitterungsablauf vor Augen.

Der Korngrößenaufbau des Sands, der Anmachwassergehalt des Kalkmörtels sowie das Mischungsverhältnis sind Parameter, die Gefügemerkmale und -eigenschaften, wie Porengrößenverteilung, Porenvolumen, kapillare Wasseraufnahme und Dampfdiffusionswiderstand bestimmen. Entsprechende Aussagen sind für den Bestand erhaltenswerter Bauwerke bedeutsam. Wird der Bindemittelanteil in einer Mischung von 1 : 4,0 auf 1 : 3,0 in Raumteilen bei vergleichbarem Wassergehalt erhöht, steigt der Gehalt an Feinporen, während sich der Median zu kleineren Porenradien hin verlagert. Daneben ist eine Erhöhung des mit der Quecksilber-Porosimetrie erfaßbaren Porenvolumens zu erkennen. Bei der Untersuchung eines bindemittelreicheren historischen Mörtels tritt diese Tendenz noch deutlicher hervor. Aber nicht nur Bindemittel- und Sandgehalt eines Mörtels üben einen solchen Einfluß aus, sondern auch die viel zu wenig beachtete Kornzusammensetzung. Zur Einstellung der Konsistenz der Mörtel mit gleichem Mischungsverhältnis (Ausbreitmaß 18 cm) benötigt der mit Feinsand bereitete Mörtel etwa ein Drittel mehr Anmachwasser. Unerwartet weist er im Vergleich zu dem andern einen Mikroporenanteil von 28 % gegenüber 55 % auf. Besonders herauszustellen ist das fast doppelt so hohe Porenvolumen. Dabei wird ein den Sanden analoges Verhalten sichtbar, bei dem Porosität, Porenfüllungsgrad und der Wasseraufnahmekoeffizient w_0 mit wachsender Feinheit zunehmen. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, daß Korngrößenaufbau und Erhöhung des Anmachwassergehalts zusammen eine erhebliche Gefügeveränderung im erhärteten Mörtel bewirken, was sich auch beim Kapillar- und Verdunstungsgeschehen im Mauerwerk widerspiegelt. So bewirken Mauerziegel eines trockengepreßten Typs mit geringer werdender Rohdichte einen Anstieg der maximalen auf die Saugfläche bezogenen Flüssigkeitsaufnahme a , die der Steighöhe äquivalent ist. Da im Falle des für dieses Mauerwerk verwendeten Verbands ungefähr 20 % der Außenfläche auf den Mörtel entfällt, ist diesem ein wesentlicher Einfluß sowohl auf den Wasseraufstieg wie auch den Verdunstungsvorgang zuzuschreiben. Verwendet man zu seiner Herstellung an-

statt des Normsands nach DIN EN 196 Teil 1 dessen Siebdurchgang $\leq 0,5$ mm, dann verschieben sich die Kennwerte wie a und w_0 in die gleiche Richtung. Gleichsinnig wirksam ist eine Erhöhung der Oberflächenspannung etwa bei Einsatz von gesättigter Calciumsulfatlösung als Versuchsflüssigkeit, wogegen sich bei dichteren Ziegeln die Verhältnisse umkehren, auch wenn man den größeren Normsand verwendet. Jedoch behindert im Vergleich zu Wasser eine solche Lösung ebenso die Verdunstung an einem feuchtigkeitsgesättigten Mauerausschnitt, wobei die Dichteunterschiede der Ziegel wegen der verschiedenen Steighöhen in der Größe der Verdunstungsfläche zum Ausdruck kommen, was schließlich zu den unterschiedlichen Startpunkten der Kurven führt. Mit Normsand hergestelltes Mauerwerk zeigt diese Erscheinung allerdings erst nach mehrmals wiederholtem Aufstieg dieser Lösung. Aus diesen Befunden geht hervor, daß das generelle Verhalten des Mauerwerks beim Feuchtigkeitstransport maßgeblich vom Porenvolumen und der Porengrößenverteilung besonders im Bereich der Kapillaraktivität, vor allem aber von der Korngrößenverteilung des Mörtelzuschlags abhängig ist, während dabei der Wasserbedarf mit sinkendem Teilchendurchmesser ansteigt.

7 Danksagung

Wir danken dem Umweltbundesamt für die Bereitstellung der Mittel, ohne die es uns nicht möglich gewesen wäre, das Vorhaben in der vorliegenden Art durchzuführen. Weiterhin sind wir den Mitarbeitern der Laboratorien "Chemische Zusammensetzung und Eigenschaften" und "Physikalische Kenngrößen; Porenstruktur" zu Dank verpflichtet. Besonders zu erwähnen sind der über das Maß an Normalem hinausgehende Einsatz von Frau Gabriele Müller, Frau Elgin Rother, Frau Edith Tessmann und Herrn Jürgen Götze. Herr Dr. Detlef Hanus war ebenfalls maßgeblich am Zustandekommen dieser Arbeit beteiligt. Herrn Dr. Stephan Fitz vom Umweltbundesamt danken wir für die geduldige Förderung und die durch ihn möglich gewordene internationale Zusammenarbeit im Rahmen der NATO-CCMS Pilot Study "Conservation of Historic Brick Structures".

8 Schrifttum

- [1] ASTM C 91 - 87a:
Standard specification for masonry cement,
Ausgabe März 1987, 5 pp.
- [2] ASTM C 448-88:
Standard methods for abrasion resistance of porcelain
enamels, Ausgabe Mai 1988, 8 pp.
- [3] Barcellona, S.; Barcellona Vero, L.; Guidobaldi, F.:
The front of S. Giacomo degli Incurabili Church in Rome:
Biological and chemical surface analyses.
Istituto di Fisica Tecnica - Consiglio Nazionale delle
Ricerche, Roma: Centro di Studio Cause de Deperimento
e Metodi di Conservazione delle Opere d'Arte 1972, No. 15.
- [4] Brunauer, S.; Emmett, P.; Teller, E.:
Adsorption of gases in multimolecular layer.
J. Amer. Chem. Soc. 60 (1938) S. 309 - 319.
- [5] Čalyj, V. P.:
Die Alterungsmechanismen einzelner Metallhydroxide
und ihrer Systeme (Orig. russ.)
Z. neorg. Chim. 8 (1963), Vgp. 2, S. 269 - 273.
- [6] Croney, D.; Coleman, J. D.; Bridge, P.M.:
The suction of moisture held in soil and other porous
materials.
Road Res. Techn. No. 24 (Dept. Sci. Ind. Res., Road Res.
Lab.); London: H.M.S.O. 1952, 42 pp.
- [7] D'Havé, R.; Motteu, H.:
Étude de la résistance au gel des matériaux de construction.
build, bâtiment international 1 (1968) No. 2, S. 18 - 23.
- [8] DIN EN 459 Teil 2:
Baukalk; Prüfverfahren. Ausgabe März 1995, 19 pp.
- [9] DIN 4188 Teil 1:
Siebböden; Drahtsiebböden für Analysensiebe; Maße.
Ausgabe Oktober 1977, 4 pp.
- [10] DIN 18 550 Teil 1:
Putz. Begriffe und Anforderungen.
Ausgabe Januar 1985, 13 pp.
- [11] DIN 18 555 Teil 1:
Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln,
Frischmörtel; Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens
nach dem Filterplattenverfahren.
Ausgabe September 1982, 2 pp.
- [12] DIN 52 108:
Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe;
Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme;
Schleifscheiben-Verfahren. Ausgabe August 1988, 3 pp.
- [13] DIN 52 615:
Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Was-
serdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen.
Ausgabe November 1987, 10 pp.
- [14] DIN 66 131:
Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen
durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmett und Teller
(BET); Grundlagen. Ausgabe Oktober 1973, 7 pp.
- [15] DIN 66 132:
Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen
durch Stickstoffadsorption; Einpunkt-Differenzverfahren
nach Haul und Dümbsen. Ausgabe Juli 1975, 5 pp.
- [16] DIN 66 133:
Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezi-
fischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilber-
intrusion. Ausgabe Juni 1993, 3 pp.

- [17] DIN EN 196 Teil 1:
Prüfverfahren für Zement; Bestimmung der Festigkeit.
Ausgabe März 1990, 16 pp.
- [18] DIN EN 196 Teil 2:
Prüfverfahren für Zement; Chemische Analyse von
Zement. Ausgabe Mai 1995, 18 pp.
- [19] Efes, Y.; Luckat, S.:
Relations between corrosion of sandstones and uptake
rates of air pollutants at the Cologne cathedral.
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. 193 - 200.
- [20] Fagerlund, G.:
Determination of specific surface by the BET method.
Matér. Constr. 6 (1973) No. 33, S. 239 - 245.
- [21] Félix, C.:
Répartitions du soufre dans les grès calcaires ("molasses")
altérés de bâtiments anciens de la région lausannoise.
Chantiers/Suisse 18 (1987) No. 2, S. 119 - 123.
- [22] Fitz, S.:
Conservation of historic brick structures. How many open
questions were left after seven years of joint efforts within
the NATO CCMS Pilot Study?
in: Proc. EC Workshop "Research on conservation of
brick masonry monuments", Heverlee/Leuven 24/10/ -
26/10/1994 (in publication).
- [23] Gall, L.:
Über ein neues Gerät zur schnellen Bestimmung spezi-
fischer Oberflächen.
Angew. Mess. Regeltechn. 4 (1964) S. 107.
- [24] Graf, O.:
Über die Prüfung der Baukalke.
Der Bautenschutz 5 (1934) No. 11, S. 121 - 135;
No. 12, S. 137 - 143.
- [25] Gregg, S.J.:
The surface chemistry of solids. 2nd ed.;
London: Chapman and Hall Ltd. 1965, 393 pp.
- [26] Grimm, W. D.; Schwarz, U.:
Naturwerksteine und ihre Verwitterung an Münchner
Bauten und Denkmälern. Überblick über eine Stadt-
kartierung.
in: Natursteinkonservierung. Internat. Kolloquium,
München 21/05/ - 22/05/1984, München: Bayer. Landes-
amt für Denkmalpflege 1986, Arbeitsheft 31, S. 28 - 118.
- [27] Grün, R.:
Die Verwitterung der Bausteine vom chemischen Stand-
punkt.
Chemiker-Ztg. 57 (1933) No. 41, S. 401 - 404.
- [28] Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsstoffe in der
Denkmalpflege.
Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbund-
forschung zur Denkmalpflege, hrsg. v. D. Knöfel und
P. Schubert; Berlin: Verlag Ernst & Sohn 1993, 225 pp.
- [29] Hanus, D.; Hoffmann, D.:
Richtungsabhängige Veränderungen von Putzmörteln als
Folge unterschiedlicher Expositionsbedingungen.
in: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Tagungs-
ber. 3. Internat. Kolloquium zum Thema Werkstoffwissen-
schaften und Bausanierung, Techn. Akademie Esslingen,
Ostfildern 15/12/ - 17/12/1992 (=Kontakt & Studium TAE
Nr. 420), hrsg. v. F. H. Wittmann; Ehningen bei Böblingen:
expert-Verlag 1993, Teil 2, S. 1012 - 1024.
- [30] Hanus, D.; Niesel, K.:
Influence of air pollutants on rendering.
in: Proc. 3rd Expert Meeting Nato-CCMS Pilot Study
"Conservation of Historic Brick Structures", Hamburg
02/11/ - 04/11/1989, hrsg. v. S. Fitz, Berlin (West):
Umweltbundesamt 1990, S. 104 - 131.
- [31] Haul, R., Dümbgen, G.:
Vereinfachte Methode zur Messung von Oberflächen durch
Gasadsorption. Chem.-Ing.-Techn. 35 (1963) S. 586 - 589.
- [32] Herrmann, A. G.; Knake, D.:
Coulometrisches Verfahren zur Bestimmung von Gesamt-,
Carbonat- und Nichtcarbonat-Kohlenstoff in magmati-
schen, metamorphen und sedimentären Gesteinen.
Z. Anal. Chem. 266 (1973) No. 3, S. 196 - 201.
- [33] Hirschwald, J.:
Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetter-
beständigkeit.
Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn 1908, 675 pp.
- [34] Hoffmann, D.:
The Federal Institute for Materials Research and Testing:
Study on lime mortar and rendering.
in: Contrib. EUROLIME Colloquium, Karlsruhe
26/05/ - 28/05/1991,
hrsg. v. German EURO CARE Secretariat, Karlsruhe 1992,
Newsletter No. 1, S. 32 - 35.
- [35] Hoffmann, D.; Hanus, D.:
Effects of air pollutants on rendering.
in: Proc. 5th Expert Meeting Nato-CCMS Pilot Study
"Conservation of Historic Brick Structures", Berlin
17/10/ - 19/10/1991, hrsg. v. S. Fitz; Berlin:
Umweltbundesamt 1992, S. 32 - 56.
- [36] Hoffmann, D.; Niesel, K.:
Ein neues Verfahren zur Beurteilung des Verschleißver-
haltens von mineralischen Baustoffen.
Tonind.-Ztg. 99 (1975) No. 9, S. 221 - 223.
- [37] Hoffmann, D.; Niesel, K.:
Quantifying capillary rise in columns of porous material.
Amer. Ceram. Soc. Bull. 67 (1988) No. 8, S. 1418.

- [38] Hoffmann, D.; Niesel, K.:
Vorgänge des kapillaren Feuchtigkeitsaufstiegs und Verdunstung in porösen Baustoffen.
AID Schriftenreihe der Sektion Architektur, TU Dresden, 1990, No. 30, S. 110 - 115.
- [39] Hoffmann, D.; Niesel K.; Rooß H.:
Zur rechnerischen Erfassung des Kapillaraufstiegs in Säulen poröser Baustoffe. Bautenschutz u. Bausanierung 10 (1987) No. 5, S. 69-70; 11 (1988) No. 1, S. 11.
- [40] Hoffmann, D.; Niesel, K.; Wagner, A.:
Capillary rise and the subsequent evaporation process measured on columns of porous material.
Amer. Ceram. Soc. Bull. 69 (1990) No. 3, 392, 394, 396.
- [41] Hoffmann, D.; Rooß, H.:
Wechselwirkung zwischen Schwefeldioxid und Kalkmörteln.
Materialprüfung 19 (1977) No. 8, S. 300 - 304.
- [42] Hoffmann, D.; Rooß, H.:
Zur Erhärtung von Purpasten aus Kalk.
Bautenschutz u. Bausanierung 17 (1994) No. 3, S. 48 - 51, No. 4, S. 57 - 63.
- [43] Hoffmann, D.; Schimmelwitz, P.; Rooß, H.:
Interactions of sulfur dioxide with lime plasters.
in: Proc. 2nd Internat. Symp. on the Deterioration of Building Stones, Athens 27/09/ - 01/1976; Athens: The Chair of Physical Chemistry of the National Technical University of Athens 1977, S. 37-42. - Dt. Fassung: Wechselwirkung zwischen Schwefeldioxid und Kalkmörteln. Materialprüf. 19 (1977) No. 8, S. 300 - 304.
- [44] 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.
in: Proc. Tenth Symp. of the Colston Research Society, London: Butterworths Scientific Publications 1958, S. 343 - 365.
- [45] Jędrzejewska, H.:
New methods in the investigation of ancient mortars.
Archeological chemistry, a symposium, hrsg. v. M. Levey; Philadelphia: Univ. Pennsylvania Press 1967, S. 147 - 166.
- [46] Informationstransfer der LaborPraxis, IonenChromatographie, Literaturdokumentation zur chemischen Analytik; hrsg. v. G. Schwedt, No. 4, 2. Auflage 1987.
- [47] Johne, R.; Severin, D.:
Die Oberflächenmessung mit dem Areameter.
Chem.-Ing.-Techn. 37 (1965) S. 57 - 61.
- [48] Kieslinger, A.:
Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr.
Leipzig, Wien: Franz Deuticke 1932, 346 pp.
- [49] Krischer, O.; Kast, W.:
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Aufl.; Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1978, 489 pp.
- [50] Krus, M.; Kiessl, K.:
Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung der Porenradienverteilung von Natursandsteinen mittels Saugspannungsmessung und Quecksilber-Druckporosimetrie. IBP (Fraunhofer-Inst. f. Bauphysik)-Bericht FtB - 11/1991, 14 pp., 6 pp. Anhang
- [51] Künzel, H.:
Sind wirklich Schadstoffe aus der Luft an der fortschreitenden Zerstörung unserer Denkmäler schuld?
Bautenschutz u. Bausanierung 10 (1987) No. 4, S. 139 -142.
- [52] Künzel, H.:
Mechanismus der Steinschädigung bei Krustenbildung.
Bautenschutz u. Bausanierung 11 (1988) No. 2, S. 61 - 68.
- [53] Luckat, S.:
Ein Verfahren zur Bestimmung der Immissionsrate gasförmiger Komponenten. Staub-Reinhalt. Luft 32 (1972) No. 12, S. 484 - 486.
- [54] Luckat, S.:
Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes. II.
Kölner Domblatt 38/39 (1974) S. 95 - 106.
- [55] Lutz, P., Jenisch, R.; Klopfer, H.; Freymuth, H.; Kampf, L.:
Lehrbuch der Bauphysik, Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand; Teil I einer Baukonstruktionslehre, Stuttgart: B.G.H. Teubner 1985, 650 pp.
- [56] Mayer, N.:
Eine Vielfach-Meßdüse zur Bestimmung von Dickenänderungen an sehr rauhen Materialproben.
Techn. Messen 46 (1979) No. 12, S. 459 - 461.
- [57] Mayer, N.; Niesel, K.:
Verschleißprüfung mineralischer Baustoffe mit rauher Oberfläche unter Anwendung eines pneumatischen Dickenmeßgeräts.
Materialprüf. 21 (1979) No. 4, S. 112 - 116.
- [58] Meucci, C.; Rossi-Doria, P.:
Analyse et caractérisation de quelque type d'anciens mortiers orientaux.
in: Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings, Proc. ICCROM Symposium, Rome, Italy 03/11/ - 06/11/1981, Rome: ICCROM 1981, S. 351 - 358.
- [59] Nacken, R.:
Über den Abbinde- und Erhärtungsvorgang der Zemente.
Zement 16 (1927), No. 43, S. 1017 - 1023; No. 44, S. 1047 - 1051.

- [60] Ney, P.:
Die Erhärtung von Luftkalkmörteln als Kristallisationsvorgang.
Zement-Kalk-Gips 20 (1967) S. 429 - 434.
- [61] Niesel, K.:
Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefelhaltiger Atmosphäre - Literaturdiskussion.
Fortschr. Miner. 57 (1979) No. 1, S. 68 - 124.
- [62] Niesel, K.:
Aspekte der Natursteinverwitterung aus der Sicht eines Materialprüfers.
Bautenschutz u. Bausanierung 9 (1986) No. 1, S. 16 - 23; No. 2, S. 60 - 66.
- [63] Niesel, K.:
Quelques aspects expérimentaux de l'étude du transfert d'humidité en maçonnerie.
Silicates Industriels 54 (1989) No. 3 - 4, S. 47 - 54.
- [64] Niesel, K.:
Migration d'humidité en maçonnerie de briques.
Revue des Archéologues et Historiens d'Art de Louvain 1989, No. 22, S. 99 - 106.
- [65] Niesel, K.:
Porositätsdaten zur Kennzeichnung des Feuchtigkeits- transports in Ziegelmauerwerk.
in: "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", Tagungsber. 3. Internat. Kolloquium zum Thema Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Techn. Akad. Esslingen, Ostfildern 15/12/ - 17/12/1992 (= Kontakt & Studium TAE No. 420), hrsg. von F. H. Wittmann; Ehnlingen bei Böblingen: expert-Verlag 1993, Teil 1, S. 67 - 80.
- [66] Niesel, K.:
Feuchtigkeitsaufstieg in porösen Baustoffen.
Materialprüfung 36 (1994) No. 10, S. 432 - 437.
- [67] Niesel, K.:
Zum Problem des Nachstellens von Kalkmörteln.
Bautenschutz u. Bausanierung 17 (1994) No. 2, S. 65 - 68.
- [68] Niesel, K.; Hoffmann, D.:
Pore characteristics and moisture in brick masonry.
in: Proc. 7th Internat. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisboa 15/06/ - 18/06/1992, hrsg. v. J. Delgado Rodrigues, F. Henriques und F. Telmo Jeremias; Lisboa Laboratório Nacional de Engenharia Civil 1992, vol. 2, S. 735 - 743.
- [69] Niesel, K.; Nehring, G.:
Ein Verfahren zur Erfassung der Volumenänderungen von Purpasten und Mörteln im Frühstadium ihrer Erhärtung.
Tonind. - Ztg. 100 (1976) No. 10, S. 362 - 364.
- [70] Niesel, K.; Roß, H.:
Aspekte der Untersuchung von Porenraumveränderungen in feuchtem Mauerwerk.
Ziegelindustrie International 36 (1983) No. 7, S. 339 - 349.
- [71] Niesel, K.; Schimmelwitz, P.:
Zur Kenntnis der Vorgänge bei der Erhärtung und Verwitterung von Dolomitmörteln.
Tonind.-Ztg. 95 (1971) No. 6, S. 153 - 161.
- [72] Niesel, K.; Schimmelwitz, P.:
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale.
BAM - Forschungsber. No. 86, Berlin (West): Bundesanst. Materialprüf. 1982, 100 pp.
- [73] 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.
- [74] Orr, C., Dallavalle, J.M.:
Fine particle measurement. New York: MacMillan 1959, 353 pp.
- [75] Purcell, W. R.:
Capillary pressures: Their measurement using mercury and calculation of permeability therefrom.
Trans. Amer. Inst. Miner. Met. Engrs. 186 (1949) S. 1 - 30.
- [76] Ravaglioli, A.; Vecchi, G.:
Assessment of frost resistance of ceramic bodies by means of porosity meter tests. in: Proc. RILEM/IUPAC Internat. Symp. on Pore Structure and Properties of Materials, Prague 18/09/-21/09/1973, hrsg. v. S. Modrý and M. Svatá, Prague: Academia 1974, final report, part IV, vol. VI, F-117 - F-127.
- [77] 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.
- [78] 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.
in: Proc. 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).
- [79] RILEM Recommendations MR 1 - 21; 1982 (E):
Testing methods of mortars and renderings. I. Ausgabe Dezember 1982, 24 pp.
- [80] Ritter, H. L.; Drake, L. C.:
Pore-size distribution in porous materials.
Ind. Engng. Chem., Anal. Ed. 17 (1945) S. 782-786.
- [81] Rodt, V.:
Zum Erhärtungsproblem der hydraulischen Bindemittel.
Tonind.-Ztg. 62 (1938) No. 17, S. 188-190.

- [82] Roß, H.; Rother, E.:
Changes in concentration of chemical constituents and of physical characteristics perpendicular to the surface of external rendering.
in: Proc. 4th Expert Meeting Nato-CCMS
Pilot Study "Conservation of Historic Brick Structures", Amersfoort (NL) 25/10/ - 27/10/1990, hrsg. v. S. Fitz, Berlin: Umweltbundesamt 1991, S. 93 - 119.
- [83] Roß, H.; Niesel, K.; Hoffmann, D.:
Über Phänomene des Feuchtigkeitstransports in Ziegeln und Mauerwerk.
GIT Fachz. f. d. Lab. 32 (1988), Suppl. 5: Materialprüfung, S. 16 - 21.
- [84] Samson-Gombert, C.:
Relations entre les altérations d'un calcaire en oeuvre et les paramètres de l'environnement, principaux résultats et applications.
in: Actes du Colloque International ASESMO/LCCM sur la Détérioration des Matériaux de Construction, La Rochelle 12/06/ - 14/06/1991, hrsg. v. F. Auger; La Rochelle: Univ. de Poitiers, Institut Universitaire Technique (IUT) 1991, S. 185 - 194.
- [85] Schimmelwitz, P., Hoffmann, D.:
Untersuchung über die Erhärtung von Außenputzen aus Luftkalkmörtel und ihre Verwitterung unter besonderer Berücksichtigung der Einwirkung von Luftverunreinigungen.
ERP-Forschungsber. 1977, Az 2222, 170 pp.
- [86] Small, H.; Stevens, T.S.; Bauman, W.C.:
Novel ion-exchange chromatographic method using conductimetric detection.
Anal. Chem. 47 (1975) No. 11, 1801 - 1809.
- [87] Spohn, E.:
Das Wasserhaltevermögen von Putz- und Mauermörteln.
Zement-Kalk-Gips 8 (1955) No. 9, S. 299 - 301.
- [88] Tombers, J.:
Untersuchungen zur Salzverteilung in verbaulichem Naturstein.
Diss. Univ. Saarl., Saarbrücken 1991, 188 pp.
- [89] Venzmer, H.; Zacharias, B.:
Zum zeitlichen Verlauf von Abdunstungsprozessen an Ziegelproben bei ausgeschlossener Wassernachförderung.
Acta Polytechnica - Práce CVUT v Praze 18, 1985 Ser. 1, No. 1/3, 71 - 89.
- [90] Wagner, A.; Niesel, K.:
Kapillarkenngrößen von Mauerziegeln. Ihre Bestimmung durch Saugversuche an Probekörpern.
Materialprüfung 31 (1989) No. 4, S. 109 - 113.
- [91] Weber, H.; Iversen, K.; Klock, H.; Schoer, H.; Winkler, H.:
Mauerfeuchtigkeit, Ursache und Gegenmaßnahmen.
(= Kontakt & Studium Techn. Akad. Esslingen No. 137: Bauwesen); Grafenau/Württ.: expert Verlag, 1984, 143 pp.
- [92] Weiß, J.; Göbl, M.:
Analyse anorganischer Schwefelverbindungen mit Hilfe der Ionen-Chromatographie. Z. Anal. Chem. 320 (1985) S. 439 - 444.
- [93] Wittenburg, C.:
Trockene Schadgas- und Partikeldeposition auf verschiedene Sandsteinvarietäten unter besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Einflußgrößen.
Diss. Fachber. Chemie, Univ. Hamburg, 14/03/1994
(=Schriftenreihe Angewandte Analytik, Univ. Hamburg, No. 22), 137 pp.
- [94] Würzner, K.:
Die physikalischen Grundlagen des Abbindens und Erhärtens.
Zement 8 (1919) No. 46, S. 559 - 562; No. 47, S. 571 - 574.
- [95] Zacharias, B.; Preuß, W.; Venzmer, H.:
Zum zeitlichen Verlauf von Abdunstungsprozessen in Baustoffen bei ausgeschlossener Wassernachförderung.
AID Architekturinformation Techn. Univ. Dresden, 1984, No. 20, 407 - 413.
- [96] Zehnder, K.; Arnold, A.:
Crystal growth in salt efflorescence.
J. Crystal Growth 97 (1989) S. 513 - 521.

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

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

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

Nr. 3/1970

J. Ziebs

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit - Grundlagen und Vergütungsverfahren

Nr. 5/1971

N. Steiner

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken

Nr. 6/1971

P. Schneider

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz

Chromatographie und chemische Konstitution - Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie

Nr. 8/1971

H. Veith

Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung

Nr. 9/1971

K.-H. Möller

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode

Nr. 11/1972

H.-J. Krause

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden

Nr. 12/1972

H. Feuerberg

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr

Nr. 14/1972

E. Fischer

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz

Nr. 15/1972

H. Pohl

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse

Nr. 16/1972

E. Knublauch

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer

Nr. 17/1972

P. Reimers

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen

Nr. 18/1973

W. Struck

Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen

Nr. 20/1973

R. Rudolphi

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden

Nr. 21/1973

D. Klafke, W. Maennig

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrütung

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen

Nr. 23/1973

W. Ruske

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

Nr. 25/1973

E. Knublauch

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

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM - Eigenschaften und erste Anwendungen

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall

Nr. 28/1974

H. Heinrich

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

Nr. 29/1974

P. Schneider

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

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher

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

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nicht-stationären Meßverfahrens

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff

Nr. 35/1976

E. Limberger

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

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

Nr. 37/1976

W. Struck

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

Nr. 38/1976

K.-H. Habig

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newtonischem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung

Nr. 40/1976

H. Hantsche

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren

Nr. 41/1976

B. Böttcher

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten

Nr. 42/1976

S. Dietlen

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft

Nr. 43/1976

W. Struck

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

Nr. 44/1976

W. Matthees

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

- Nr. 45/1976
W. Paatsch
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
- Nr. 46/1977 (vergriffen)
G. Schickert, H. Winkler
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
- Nr. 47/1977
A. Plank
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
- Nr. 48/1977
U. Holzlöhner
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
- Nr. 49/1977
G. Wittig
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
- Nr. 50/1978 (vergriffen)
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiers, G. Andreae, W. Markowski
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
- Nr. 51/1978
J. Sickfeld
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
- Nr. 52/1978
A. Tomov
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
- Nr. 53/1978
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
- Nr. 54/1978
H. Sander
Magnetisches Verhalten dünner Eisen-schichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 55/1978
D. Klaffke
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-A1-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
- Nr. 56/1979
W. Brünner, C. Langlie
Stabilität von Sandwichbauteilen
- Nr. 57/1979
M. Stadthaus
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing
- Nr. 58/1979
W. Struck
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
- Nr. 59/1979
G. Plauk
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
- Nr. 60/1979
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
- Nr. 61/1979
K. Richter
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmatrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
- Nr. 62/1979
W. Gerisch, G. Becker
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
- Nr. 63/1979
E. Behrend, J. Ludwig
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
- Nr. 64/1980
W. Rücker
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
- Nr. 65/1980
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
- Nr. 66/1980
M. Hattwig
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
- Nr. 67/1980
W. Matthees
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
- Nr. 68/1980
D. Petersohn
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines volleukzentrischen Präzisions-Goniometers
- Nr. 69/1980
F. Buchhardt, P. Brandl
Untersuchungen zur Integrität den Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
- Nr. 70/1980 (vergriffen)
G. Schickert
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
- Nr. 71/1980
W. Matthees, G. Magiera
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
- Nr. 72/1980
R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
- Nr. 73/1980
P. Wegener
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
- Nr. 74/1980
R. Rudolphi, R. Müller
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
- Nr. 75/1980
H.-J. Heinrich
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
- Nr. 76/1980
D. Klaffke, W.-W. Maennig
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
- Nr. 77/1981
M. Gierloff, M. Mautzsch
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
- Nr. 78/1981
W. Rücker
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
- Nr. 79/1981
V. Neumann
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantatversuch
- Nr. 80/1981
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
- Nr. 81/1981
J. Schmidt
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
- Nr. 82/1982
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Asessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
- Nr. 83/1982
H. Czichos, P. Feinle
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -
- Nr. 84/1982
R. Müller, R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231 -X/1982
H. Czichos
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" -
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982
K. Niesel, P. Schimmelwitz
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982
B. Isecke, W. Stichel
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren

- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983
A. Erhard
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983
D. Conrad, S. Dietlen
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983
M. Weber
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983
L. Auersch
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983
P. Studt
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983
Xian-Quan Dong
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983
M. Römer
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983
H. Eifler
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983
G. Fuhrmann, W. Schwarz
Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983
E. Schnabel
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren
- Stretch- und Erholungsvermögen -**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984
G. Klamrowski, P. Neustupny
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding
Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984
G. Magiers
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984
D. Schnitger
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984
M. Gierloff
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984
B. Schulz-Forberg
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984
J. Lehnert
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984
W. Stichel, J. Ehreke
Korrosion von Stahlradiatoren
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984
L. Auersch
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985
M. Omar
Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985
H. Walde, B. Kropp
Wasserstoff als Energieträger
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985
K. Ziegler
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985
W. Lützwow
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985
K. Richter
Farbempfindungsmerkmal Elementaruntun und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985
H. Czichos, G. Sievers
**MaterialsTechnologies and Techno-Economic Development
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung - Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 1
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 1**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986
A. Hecht
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986
P. Feinle, K.-H. Habig
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986
J. Mischke
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste**
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986
D. Rennoch
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986
H.-M. Thomas
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)
B. Droste, U. Probst
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986
W. Stichel
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 1
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 1**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 11
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 11**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1986 (vergriffen)
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**

- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986
W. Struck
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 11
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 11
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987
Chr. Herold, F.-U. Vogdt
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)
M. Woydt, K.-H. Habig
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987
G. Andreas, G. Niessen
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987
H.-J. Deppe, K. Schmidt
Untersuchung zur Beurteilung von Brett-schichtverleimungen für den Holzbau
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987
M. Dogurike, F. Buchhardt
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987
J. Olschewski, S.-P. Scholz
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively
- Loaded Reinforced Concrete Members**
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktor-gebäudes
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987
U. Holzlöhner
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
- Nr. 146/ISBN 3-88314 714-1/1987
W. Schon, M. Mallon
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987
H.-D. Kleinschrodt
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988
W. Müller
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988
U. Holzlöhner
Bestimmung baugrunddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988
M. Weber
VG3D Zeichenprogramm für vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988
L. Auersch-Saworski
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988
G. Plauk, G. Kretschmarin, R.-G. Rohrmann
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988
H. Sander, W.-W. Maennig
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988
K. Breikreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988
L. Auersch
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989
E. Limberger, K. Brandes
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989
R. Wäsche, K.-H. Habig
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989
R. Müller, R. Rudolphi
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160, Teil 6
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989
W. Matthees
Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989
G. Mellmann, M. Maultzsch
Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989
W. Brünner
Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck
Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork
Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989
P. Gobel, L. Meckel, W. Schiller
Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission - Teil B: Textilien
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989
K. Breikreutz
Modelle für Stereologische Analysen
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989
A. Mitakidis, W. Rücker
Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi
Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990
Chr. Kohl, W. Rucker
Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990
P. Studt, W. Kerner, Tin Win
Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990
F. Buchhardt
Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung

- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990
J. Vielhaber, G. Plauk
Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg
Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski
Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990
W. Matthees, G. Magiera
Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggenhauser
Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991
G. Andrae, J. Knapp, G. Niessen
Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991
H. Eifler
Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991
E. Klement, G. Wieser
Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow
Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs
- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992
M. Weber
Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992
F. Buchhardt
Zur Dekonvolution im Zeitbereich
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-M. Vater
Feldversuche zur Einwirkung von Aufbaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992
Renate Müller
Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig
Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992
Th. Schneider, E. Santner
Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten. Literaturübersicht
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992
K. Mallwitz
Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992
W. Matthees, G. Magiera
Impedanzeigenschaften von Finiten Elementen Modellen bei Integration im Zeitraum
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992
G. Zachariev
Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992
H.-M. Bock, S. Erbay, J. With
Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte; Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn
Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfea/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993
U. Krause
Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993
U. Schmidtchen, G. Würsig
Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993
D. Lietze
Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993
A. Skopp
Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994
St. Meretz
Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994
W. F. Rüdcker, S. Said
Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggenhauser
Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994
U. Holzlöhner, H. August, T. Meggyes, M. Brune
Deponieabdichtungssysteme; Statusbericht
- Nr. 202/ISBN 3-89429-481-7/1994
J. Schmidt
Über eine Verteilungsfunktion mit Parametern für Median, Spannweite, Schiefe und Wölbung; Konzept und Anwendung
- Nr. 203/ISBN 3-89429-483-3/1994
B. Schulz-Forberg, J. Ludwig
Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut
- Nr. 204/ISBN 3-89429-484-1/1994
W. Struck, E. Limberger
Der Glaskugelsack als Prüfkörper für Beanspruchungen durch weichen Stoß - eine erweiterte Modellvorstellung
- Nr. 205/ISBN 3-89429-516-3/1995
P. Rose
Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale zur rechnergestützten Bildauswertung von Schweißnahradiographien
- Nr. 206/ISBN 3-89429-517-1/1995
D. Lietze
Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Speerschichten aus Bandsicherungen bei Deflagrationen und bei einem Nachbrand
- Nr. 207/ISBN 3-89429-593-7/1995
W. Daume
Zur objektiven Beurteilung der Bildqualität industrieller Radioskopiesysteme
- Nr. 208/ISBN 3-89429-557-0/1995
G. Kalinka
Ein Beitrag zur Kristallisation gefüllter und ungefüllter Thermoplaste
- Nr. 209/ISBN 3-89429-594-5/1995
D. Hoffmann, K. Niesel
Zur Quantifizierung des Effekts von Luftverunreinigungen auf Putzmörtel

**Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)**

**Federal Institute for
Material Research and Testing**

**Institut Fédéral pour la
Recherche et l'Essai des Matériaux**

Unter den Eichen 87
D-12205 Berlin
☒ D-12200 Berlin

Telefon (0 30) 81 04-0
Telefax (0 30) 8 11 20 29
Telex 1 83 261 bamb d

- *Berichte*
- *Gutachten*
- *Zulassungen*
- *Zertifikate*
- *Tagungspapiere*
- *Prüfungszeugnisse*
- *Prüfstellenanerkennungen*

