Kalkbeschichtungen in der Denkmalpflege

Untersuchungen zur Substratabhängigkeit feuchtetechnischer Eigenschaften von Anstrichen und Schlämmen in Mehrschichtsystemen

Dem
Fachbereich Geowissenschaften und Geographie
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.
genehmigte Dissertation

von

Dipl. Min. Barbara Blöchl-Wirts

geboren am 26.11.62
in Augsburg.

2001

Referent: Prof. Dr. W. Johannes
Korreferent: Prof. Dr. D. Knöfel

Tag der Promotion: 24.04.2000
Veröffentlichung: Februar 2001

Zusammenfassung

Obwohl Kalk als traditionelles Baumaterial schon lange bekannt ist, besteht noch ein großes Defizit an wissenschaftlichen Erkenntnissen, beispielsweise über die Wirkung und Funktion als Beschichtung an historischer Bausubstanz im Bereich der Denkmalpflege. Eine zu modernen Baustoffen vergleichbare Normierung fehlt.
Im Rahmen dieser Arbeit werden die hygrischen Eigenschaften verschiedener, auf Kalk basierender Beschichtungssysteme vorgestellt. Im Vordergrund steht dabei der Vergleich von Laborpräparaten und Daten, die am historischen Objekt gewonnen wurden. Das Untersuchungsprogramm am Objekt beinhaltet Beobachtungen an verschiedenen Schlämmen, die am äußeren Ziegelmauerwerk der Kirche in Eilsum/Norddeutschland appliziert und einen längeren Zeitraum in ihrem Verwitterungsverhalten beobachtet wurden. Die dort gewonnenen Daten werden mit Daten von in gleicher Weise dazu hergestellten Laborpräparaten sowie anschließend entnommenen Bohrkernen verglichen. Im Innenraum der Kirche in Campen/Norddeutschland zeigt ein einfacher Test an mehrfach überdeckten mittelalterlichen Wandmalereien die gravierenden Veränderungen der hygrischen Eigenschaften einzelner Schichten nach einer stufenartigen Freilegung.
Die detaillierte Untersuchung von Laborpräparaten bestätigt, daß die jeweils gewählten Rahmenbedingungen den kapillaren und diffusiven Feuchtigkeitstransport deutlich beeinflussen können. Dazu wurden unterschiedliche mit bis zu sechs Beschichtungen versehene Kalkputze auf veränderte Wasseraufnahme, Wasserdampfdurchlässigkeit und Trocknung unter verschiedenen Klimakonditionen geprüft.
Ein Vergleich der am Objekt und im Labor gewonnenen Daten zeigt, daß die hygrischen Eigenschaften von dünnen Beschichtungen hauptsächlich von der Zusammensetzung der Beschichtung abhängen. Der Porenraum und die Oberflächenbeschaffenheit des Untergrundes gewinnen stärker an Einfluss, je durchlässiger und offenporiger dünn aufgetragene Systeme sind. Dicker aufgetragene Kalk-Schlämmen können den Untergrundeinfluß hingegen gut abschirmen. Im Falle der im Labor untersuchten Verbundsysteme spielen das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis und die Körnung der Kalkputze eine entscheidende Rolle bei der Ausprägung des kapillaren und diffusiven Feuchtigkeitstransports. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstände entsprechen den jeweiligen Porenradienverteilungen der Trägerputze. Ein hoher Porenanteil des Trägers geht mit einer größeren Wasserdampf-Durchlässigkeit des Verbundsystems einher. Die hygrischen Eigenschaften, die teilweise oder ausschließlich auf kapillarem Transport beruhen, weichen hiervon ab. Während der Trocknung zeigen die beschichteten Putzträger mit den geringeren Kapillarporenanteilen im zweiten Trocknungsabschnitt höhere Trocknungsgeschwindigkeiten als die beschichteten Putze mit den höheren Kapillarporenanteilen. Überraschend zeigen alle beschichteten Kalkputze mit grober Sieblinie trotz geringerer Kapillarporenanteile eine stärkere kapillare Wasseraufnahme, als Kalkputze mit äquivalentem B/Z-Verhältnis und feiner Sieblinie. Die Carbonatisierungsbedingungen des Substrats und gegebenenfalls entstandenen Versinterungen zeigen haben ebenfalls einen deutlichen Einfluss.

Abstract

Mortars and paintings based on lime are historically and traditionally used building materials. Despite this fact, there is still a considerable lack of basic knowledge about the physical properties of these materials, particularly in the light of use for restoration and protection of historical monuments and buildings, e.g. coatings of wall surfaces.

This study presents investigations on the hygrical properties of a variety of coating systems based on lime. The investigations comprise laboratory experiments and in-situ tests performed on slurries outside of the historic brick facade of the medieval church in Eilsum / N-Germany as well as at medieval mural paintings inside the church in Campen / N-Germany. The hygrical properties of the likewise prepared samples from the laboratory experiment were also compared with those of core drilled samples.

In further laboratory experiments samples of lime mortar with varying composition were coated by several different lime based painting systems consisting of multiple layers. These samples were used to determine the characteristics of water absorption, water vapor diffusion and drying behavior under varying climate-conditions.

A comparison of all data show a higher dependence on the coating-material composition in particular than on the surface properties of the substrate. If the capillary activity of the coating increases, the dependence of the substrate properties, porosity and surface increases too.

The results of the laboratory experiments confirm the strong influence of the chosen experimental conditions on the capillary and diffusive moisture transport. Both, capillary and diffusive transport are considerably influenced by the composition, binder-aggregate ratio and the grain size of the substrate.

The vapor diffusion correlates well with the pore volume of the substrate.

The hygrical properties depending partly or exclusive to capillary transport mechanism show unexpected behavior:

Samples with multiple layer coatings which have lower capillary pore volume show higher drying-rates than those with higher capillary pore volume. The capillary water absorption rate of samples with larger grain size and lower capillary pore volume is higher than the one of samples with similar binder/aggregate ratios and smaller grain size.

Also the climate conditions during the carbonation of the mortars have a considerable influence on the resulting hygric properties.

Schlagworte: Kalkbeschichtung, Schlämme, Wandmalerei, hygrische Eigenschaften, Denkmalpflege

Keywords: coating systems based on lime, slurries, mural painting, hygrical properties, monument protection

Auszüge aus: Max Goldt. „Das innere Singen des Damfpes“. Erschienen in „Schließ einfach die Augen und stell dir vor, ich wäre Heinz Klunker“, Ausgesuchte Texte 1994, Haffmanns Verlag AG Zürich.

...Sie sehen erstens: Isomerischer Alpha-Dünndampf neutralisiert die temperatursenkende Wirkung von Lärm, und Sie sehen zweitens: Wissenschaft ist nicht nur abgehoben, sondern kann im Gegenteil sehr viel Spaß machen.

...Jetzt schauen Sie alle verdutzt: Ich habe eben den Begriff „dampfverwandte Erscheinungen“ benutzt. Denn, auch wenn es dem Laien nicht unmittelbar einleuchten mag, es ist nicht alles Dampf was dampft. Wir unterscheiden mindestens fünf Gruppen:

1. Die echten Dämpfe
2. Die Gabrielschen Dämpfe, benannt nach Prof. Ernst Gabriel, der den Begriff „dampverwandte Erscheinungen“ geprägt hat. Mit seiner Witwe habe ich gestern gegessen. Sie leitet das Damenprogramm der Dampfforscherfrauen....
3. Die dampfähnlichen Wärmenebel
4. Die dampfähnlichen Unterdruckschwaden
5. Die scheinbaren Schwaden

....

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Nutzen oder Schaden durch Freilegen historischer Wandmalerei im Sinne der Substanzerhaltung“ des Landesverwaltungsamtes - Institut für Denkmalpflege – in Hannover und wurde durch Forschungsmittel des Landes Niedersachsen (Kapitel 0608 TG 74) finanziell unterstützt.
Für die Vergabe der Arbeit und für die Betreuung bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. W. Johannes vom Institut für Mineralogie der Universität Hannover. Herrn Prof. Dr. S. Knöfel vom Institut für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-GH Siegen sei für die Übernahme des Korreferates gedankt.
Bei den Mitarbeitern des Dezernates E5 des Institutes für Denkmalpflege möchte ich an dieser Stelle meinen großen Dank für ihre Mithilfe und die ständige Diskussionsbereitschaft aussprechen, die durch ein tolles Arbeitsklima zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.
Vor allem Dr. Erwin Stadlbauer, unter dessen Anregung dieses Thema entstand, sei für die vielen Anregungen und die unzähligen fruchtbaren Diskussionen ganz herzlich gedankt. Dipl. Chem. Rolf Niemeyer gebührt der Dank für die Unterstützung bei der Auswertung und Interpretation der Analysenergebnisse sowie seine immerwährende Diskussionsbereitschaft, vor allem in mathematischer Hinsicht.
Für ihre große Verlässlichkeit und die akurate Durchführung der Laboranalysen möchte ich Frau Barbara Strittmatter danken.
Herrn Prof. Dr. S. Knöfel möchte ich für die Bereitstellung von Messzeiten am Institut für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-GH Siegen meinen herzlichen Dank aussprechen. Herrn Dr. Karl G. Böttger sei für die Betreuung, die ausgiebigen Diskussionen sowie die kritische Durchsicht meiner Arbeit während seines Urlaubs ganz herzlich gedankt. Für die Einführung und Hilfe am Quecksilberdruckporosimeter sowie die schöne Unterbringung möchte ich Frau B. Dörr danken.
Bei Dr. Max Wilke und Dr. Antje Wittenberg vom Institut für Mineralogie möchte ich mich ebenfalls sehr für die kritische Durchsicht meines Manuskriptes bedanken.
Zu guter Letzt soll meiner großen und meiner kleinen Familie der allerherzlichste Dank für ihre Unterstützung und die Betreuung von Ronja vor allem in der Endphase ausgesprochen werden, ohne die der Abschluß dieser Arbeit nur schwer möglich gewesen wäre. Meinem Mann Christian und unserer quirligen, immer zu Späßen aufgelegten Tochter Ronja danke ich sehr für die vielen Auszeiten sowie vor allem unserem Prüfungsbaby Maike für ihre Rücksichtsnahme gegenüber meinen vermutlich geburtsunerfahrenen Prüfern.

Kalkbeschichtungen in der Denkmalpflege

Untersuchungen zur Substratabhängigkeit feuchtetechnischer Eigenschaften von Anstrichen und Schlämmen in Mehrschichtsystemen

Vorwort I

Inhaltsverzeichnis III

Abkürzungsverzeichnis VII

1 Einleitung und Problemstellung 1

2 Untersuchungsmethoden 5

2.1 Bestimmung feuchtetechnischer Materialeigenschaften 5

2.1.1 Präparation und Vorkonditionierung 5

2.1.2 Wasserdampf-Diffusionswiderstand 6

2.1.3 Trocknungsgeschwindigkeit 11

2.1.4 Kapillare Wasseraufnahme 13

2.1.5 Sorptionsfeuchte 17

2.2 Chemisch-mineralogische Analyseverfahren 18

2.2.1 Lichtmikroskopie (Durchlicht- und Auflichtverfahren) 18

2.2.2 Rasterelektronenmikroskopie 18

2.2.3 Röntgendiffraktometrie 18

2.2.4 Salzanalyse 19

2.2.5 Mikrochemische Tests 19

2.2.6 Mörtelanalyse 21

2.2.7 Quecksilberdruckporosimetrie 23

3 Objektuntersuchungen: 25

3.1 Kalkschlämmen als Schutz- und Verschleißschicht – Fallbeispiel Eilsum 25

3.1.1 Einleitung 25

3.1.2 Beschreibung der Testsysteme 27

3.1.3 Vorbehandlung des Untergrundes und Applikation 29

3.1.4 Naturwissenschaftlich-denkmalpflegerische Analyse einfacher und

komplexer Kalksysteme 31
3.1.4.1 Durchgeführte Untersuchungen – Überblick 31
3.1.4.2 Salzanalyse 33
3.1.4.3 Optische Erscheinung/Mikroskopie der Oberfläche 35
3.1.4.4 Kapillare Wasseraufnahme 44
3.1.4.5 Wasserdampf-Durchlässigkeit 48
3.1.4.6 Trocknungsverhalten 50
3.1.4.7 Porenraumentwicklung 53
3.1.4.8 Salzaufnahmefähigkeit einiger körperhafter Schlämmen 55
3.1.4.9 Mikrobiologie 57
3.1.5 Zusammenfassung 57
3.1.6 Schlußfolgerung/Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Objekte 61

3.2 Komplexe Schichtfolgen im Innenraum – Fallbeispiel Campen und Lüne 64
3.2.1 Einleitung 64
3.2.2 Objektbeschreibung 66
3.2.2.1 Ev. ref. Kirche in Campen/Ostfriesland 66
3.2.2.2 Kloster Lüne/Lüneburg, Refektorium 68
3.2.3 Vergleichende Untersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung 69
3.2.3.1 Ev. ref. Kirche in Campen/Ostfriesland 69
3.2.3.2 Kloster Lüne/Lüneburg, Refektorium 69
3.2.3.3 Folgerung 72
3.2.4 Differenzierte Betrachtung der Schichteigenschaften 72
3.2.4.1 Ev. ref. Kirche Campen 72
3.2.4.2 Fortschreitende Entwicklung hygrischer Eigenschaften freigelegter Tüncheschichten 76
3.2.4.3 Kloster Lüne 81
3.2.5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen 82

4 Feuchtechnische Untersuchungen an Modellpräparaten auf Kalkbasis 85

4.1 Einleitung 85
4.2 Anfertigung und Untersuchung der Prüfkörper 86
4.2.1 Kalkputz als Substratmaterial 86
4.2.1.1 Zusammensetzung des Ausgangsmaterials 87
4.2.1.2 Prüfkörperherstellung und Carbonatisierungsbedingungen 89

4.2.1.3 Carbonatisierungsrate in Abhängigkeit von der Konditionierung der Mörtel 92
4.2.1.4 Veränderung der Wasserdampf-Durchlässigkeit während der Carbonatisierung 94
4.2.1.5 Porosität und mechanische Eigenschaften 96
4.2.1.6 Wasserdampf-Durchlässigkeit 102
4.2.1.7 Kapillare Wasseraufnahme 102
4.2.2 Beschichtungssysteme 104
4.2.2.1 Zusammensetzung und Herstellung 104
4.2.2.2 Applikation und Prüfkonzept 105
4.2.2.3 Carbonatisierungsverhalten 107

4.3 Untersuchung der substratabhängigen Effekte 108
4.3.1 Wasserdampf-Durchlässigkeit 108
4.3.2 Kapillare Wasseraufnahme 112
4.3.2.1 Verbundsysteme mit Kalk-Emulsionen 114
4.3.2.2 Verbundsysteme mit Kalk-Kaseinfarben 119
4.3.2.3 Verbundsysteme mit reiner Kalkfarbe 124
4.3.2.4 Einfluß des Klimas und der Vorkonditionierung der Proben 127
4.3.3 Trocknungsgeschwindigkeit 132

4.4 Zusammenfassung 138

5 Zusammenfassung 141

6 Diskussion 144

7 Ausblick 150

8 Literaturverzeichnis 152

9 Anhang 161

Abkürzungsverzeichnis

s_d-Wert: Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
µ-Wert: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-]
w-Wert: Wasseraufnahmekoeffizient [kg/(m2$\cdot\sqrt{h}$)]
W: flächenbezogene Wasseraufnahme [kg/m2]
Wv: flächenbezogene Wasseraufnahme unter Vakuum [kg/m2]
Wa: flächenbezogene Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck [kg/m2]
vt: Trocknungsgeschwindigkeit (in dieser Arbeit in) [kg/m2*h]
r.F.: relative Luftfeuchtigkeit [%]
PU: Polyurethan
WDD-Messung: Wasserdampfdiffusions-Messung
t: Zeit
h: Stunde
Wkh: Weißkalkhydrat
Skh: Sumpfkalkhydrat
B/Z: Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis
W/B: Wasser/Bindemittel-Wert
BK: Bohrkern
REM: Rasterelektronenmikroskop
IfD: Institut für Denkmalpflege
NLD: Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

<u>Proben und Beschichtungsabkürzungen:</u>

S1-S16: Schlämmen Nr. 1-Nr.16; Zusammensetzung siehe unter Abschnitt 3.1.2
PI-PVIII: Putz Nr. I - Nr. VIII; Zusammensetzung siehe unter Abschnitt 4.2.1.1
a: Carbonatisierungsbedingungen a; siehe unter Abschnitt 4.2.1.2
d: Carbonatisierungsbedingungen d; siehe unter Abschnitt 4.2.1.2
Beschichtungssysteme (genaue Zusammensetzung unter Kapitel 4.2.2.1):

Kasein min.	oder (kk):	Kalk-Kaseinfarbe mit geringer Kaseinzugabe
Kasein max.	oder (KK):	Kalk-Kaseinfarbe mit hoher Kaseinzugabe
Leinöl min.	oder (l):	Kalk-Emulsion mit geringer Leinölzugabe
Leinöl max.	oder (L):	Kalk-Emulsion mit hoher Leinölzugabe
g:	grundiert	

Beispiel:
P IV KKg d: Die Probe besteht aus dem Träger mit der Putzrezeptur Nr. IV, der unter den Lagerungsbedingungen d carbonatisiert ist und mit einer Kalk-Kaseinbeschichtung mit maximaler Kaseinzugabe grundiert und beschichtet wurde.

1 Einleitung und Problemstellung

Kalk ist ein traditionelles Baumaterial, dessen Verwendung schon von alten Autoren VITRUV (ca. 25 n. Chr.), PLINIUS d.Ä. (60 n. Chr), PALLADIO (1570) beschrieben wird. Obwohl dieses Material so lange bekannt ist, besteht ein großes Defizit an wissenschaftlichen Erkenntnissen, beispielsweise über die Wirkung und Funktion als Beschichtung im Bereich der Denkmalpflege. Eine zu modernen Baustoffen vergleichbare Normierung fehlt.

Die im Gegensatz zu Deutschland in Schweden und Dänemark ungebrochene Tradition für Restaurierung historischer Bausubstanz in erster Linie Kalkrezepturen zu verwenden, beruht hauptsächlich auf empirischen Erfahrungswerten und Überlieferungen. Alte Kalk-Techniken sind in Deutschland weitgehend verloren gegangen. Die Wiederaufnahme des Themas Kalk als Beschichtungsmaterial kann als Chance gesehen werden, durch gezielte Forschung unter Beachtung der Überlieferungen aus den skandinavischen Ländern, wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse zu gewinnen. Diese Daten werden der häufig emotional geführten Diskussion um die Verwendung von Kalk oder Zement neue Argumente liefern. Eine umfassende Zusammenstellung der heute üblichen Methoden und Vorgehensweisen zur Eignungsprüfung dieser Materialien ist dem ‚Handbuch - Mörtel und Steinergänzungsstoffe' von KNÖFEL & SCHUBERT (Hrsg.) 1993 zu entnehmen.

Da die Entwicklung der Eigenschaften von Kalkbeschichtungen oder –mörtel nicht nur von der Zusammensetzung abhängig ist, sondern auch stark durch den Untergrund und die Exposition am Bauwerk beeinflusst wird, sind objektbezogene Untersuchungen unverzichtbar. So ist die oft bestaunte Langlebigkeit einiger historischer Kalkmörtel nicht nur auf die heute vorhandene, im Laufe der Jahre veränderte Zusammensetzung zu sehen, sondern muß auch auf dementsprechend günstige Rahmenbedingungen am Objekt zurückgeführt werden (Exposition, Untergrund, Klima). DOMINIK & TANDINA 1996 beschreiben beispielsweise die unterschiedliche Entwicklung der Eigenschaften mineralischer Schlämmen in Abhängigkeit von der Porenradienverteilung und dem entsprechenden Saugverhalten der tragenden Gesteine sowie dem daraus resultierenden ‚Restwassergehalt' der Schlämmen. Im Labor unter kontrollierten Bedingungen gewonnene Werte müssen daher im Verhältnis zu vergleichbaren Systemen an verschiedenen Objekten, die unterschiedliche Rahmenbedingungen bieten, gesetzt werden. Dazu ist es notwendig, die Probeflächen über einen längeren Zeitraum zu beobachten und zu beurteilen. Viele Zusammenhänge zu Veränderungen der Eigenschaften

von Beschichtungen sind in Abhängigkeit von der Exposition und Expositionsdauer im Einzelnen noch nicht erkannt. Diese Arbeit soll zu dessen Klärung einen Teil beitragen.

Verschiedene Faktoren beeinflussen Oberflächen und Beschichtungen, sowohl außen als auch im Innenraum. Am wichtigsten ist meist der Faktor Feuchtigkeit, die in allen Aggregatzuständen auf die Bausubstanz einwirken kann. Bauschädliche Salze werden darin transportiert und können (teilweise auch zyklisch) auskristallisieren, bzw. bedingen als stark hygroskopische oder deliquescente Vertreter eine dauerhaft hohe Mauerfeuchtigkeit. Diese wiederum kann die Grundlage für mikrobiellen Bewuchs bieten und so zu biogenen Schäden führen. Weiterhin spielt die trockene und feuchte Deposition von Luftschadstoffen (beispielsweise SO_2, NO_X), die sich im Porenwasser des Baumaterials lösen und durch die Bildung von Salzen oder Säuren Schäden hervorrufen können eine große Rolle. Eine detaillierte Beschreibung schädigender Einflüsse auf Beschichtungen findet sich in BRANDES 1995 und in der ausführlichen Literaturübersicht von BÖTTGER 1997.

In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die Ausprägung der hygrischen Eigenschaften von Beschichtungssystemen gelegt (Wasserdampf-Durchlässigkeit, kapillare Wasseraufnahme und Trocknungsverhalten). Über die Intensität der jeweiligen Feuchtetransportmechanismen können Beschichtungssysteme sowohl im Labor als auch am Objekt charakterisiert werden. Dabei soll anhand von Objektuntersuchungen gezeigt werden, wie unterschiedlich stark die hygrischen Eigenschaften von Beschichtungssystemen in Abhängigkeit von der Umgebung, dem Gesamtsystem Mauerwerk sowie dem Klima, beeinflusst werden.

Dazu werden in erster Linie auf Kalk basierende Schlämmen an der Außenwand einer Backsteinkirche unter Freibewitterung über einen längeren Zeitraum beobachtet. Die feuchtetechnische Entwicklung der bewitterten Systeme wird im Vergleich zu an Laborpräparaten gewonnenen Daten bewertet. Im Innenbereich wird am Beispiel eines stark feuchte- und salzbelasteten Wandmalereisystems die Dynamik der feuchtetechnischen Eigenschaften einzelner Schichten nach dem Freilegen beobachtet und interpretiert.

Die Ausprägung substratabhängiger feuchtetechnischer Eigenschaften von Beschichtungssystemen mit Kalk als Hauptbindemittel unter kontrollierten Bedingungen ohne Salzbeeinflussung sollen Untersuchungen im Labor aufzeigen. Dazu werden Kalkputze, die sich in Bindemittel/Zuschlagverhältnis unterscheiden sowie unterschiedlichen Carbonatisierungsbedingungen ausgesetzt wurden, als Substrat genau charakterisiert und mit verschiedenen auf Kalk basierenden Anstrichen versehen. Diese Verbundsysteme werden mit wachsender Beschich-

tungsanzahl in der Veränderung der Wasserdampf-Durchlässigkeit, der kapillaren Wasseraufnahme und des Trocknungsverhaltens überprüft und bewertet.
Beschichtungen als Schutzsysteme für historische Bausubstanz sollten unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden: Neben der ästhetischen Funktion steht auch der Feuchteschutz im Vordergrund. Je nach Anspruch an das Beschichtungssystem kommen unterschiedliche Materialien in Abhängigkeit vom Untergrund, der Exposition des Bauwerks, der Beanspruchung sowie eine variable Auftragsdicke in Frage. Die genaue Kenntnis der historischen Untergründe ist notwendig, um eine Beschichtung darauf anzupassen.
Kalk steht in dieser Arbeit auch deshalb als Thema im Mittelpunkt des Interesses, weil dieses Material als Hauptbindemittel im Anwendungsbereich historischer Bausubstanz einige Vorteile bieten kann. Die oft weichen Untergründe, beispielsweise schwach gebrannte Ziegel und historische Mörtel lassen Ersatzmaterialien mit hohen Festigkeiten nicht zu. Durch die im Vergleich zu Zement geringere Festigkeit des Kalkes wird eine zu große Spannungsübertragung auf den Putzgrund vermieden, die zu Abplatzungen führen kann. Die verschiedenen Eigenschaften der Baumaterialien auf Kalkbasis können durch variable Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse, Wasser/Bindemittel-Werte, Sieblinien sowie weitere Zusatzmittel verändert, bzw. verbessert und dem jeweiligen Anspruch angepaßt werden (Salzverträglichkeit, Wasserretention, Wasserabweisung, -durchlässigkeit, etc.). Literatur hierzu findet sich beispielsweise in: HERM 1993, HOFFMANN & NIESEL 1993, SCHÄFER & HILSDORF 1993, BÖTTGER & KNÖFEL 1994, BOENKENDORF et al. 1994, RAUSCHENBACH 1994, MEIER 1995, BÖTTGER & KNÖFEL 1996, KRAUS 1996, BÖTTGER 1997, HERM 1997. So wird beispielsweise die bereits beschriebene Langlebigkeit einiger alter Kalkmörtel aufgrund nachgestellter Versuche von KRAUS et al. 1989 unter anderem auf ein heute in Vergessenheit geratenes Löschverfahren zurückgeführt: Durch dieses Trockenlöschverfahren wird ein grobes Kalkbindemittel hergestellt, das beim Anmachen deutlich weniger Wasser benötigt. Dadurch lassen sich bindemittelreichere Mörtel mit deutlich geringerem Schwinden herstellen. Der hohe Bindemittelgehalt verbessert die ‚Selbstheilungsfunktion' des Mörtels, und die Dichte nimmt insgesamt zu.
Im Außenbereich finden bei der Restaurierung heute oft hydraulische Kalke Anwendung, die Zement enthalten oder aus Trasskalk bestehen (STRÜBEL et al.1992, WEBER 1995, KRAUS 1996). Diese Materialien können auf problematischen Untergründen aufgrund der enthaltenen löslichen Salze zu Schäden führen (ARNOLD 1984, BLÄUER-BÖHM 1994, DIETZ 1995). Da *natürliche* hydraulische

Kalke zwar zur Verfügung stehen, diese jedoch kaum angewandt werden, sind in einer Arbeit von GÖDICKE-DETTMERING 1997 die baustoffphysikalischen Eigenschaften von Mörteln aus hydraulischen Baukalken (Weißkalkhydrat und Trass sowie Weißkalkhydrat und Zement) mit verschiedenen Zuschlägen und Sieblinien untersucht und gegenübergestellt worden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Mörtel sind für die Anwendung als Putz oder Fugenmörtel auf historischem Bauuntergrund konzipiert und stellen als Putz eine Schutzbeschichtung im weiteren Sinne dar.

2 Untersuchungsmethoden

Da die hygrischen Eigenschaften von Beschichtungssystemen ausschlaggebend für die Feuchtebilanz von Bauwerken sind, stellen in dieser Arbeit feuchtetechnische Prüfungen am Objekt sowie an Laborpräparaten den Untersuchungsschwerpunkt dar.
Der Porenraum von porösen Beschichtungen, die der Witterung, Salz- und Feuchtebelastungen ausgesetzt sind, verändert sich. Anhand feuchtetechnischer Untersuchungen am Objekt und im Labor lassen sich Veränderungen feststellen, die sich im Laufe der Zeit expositionsbedingt an Beschichtungssystemen ergeben.
Feuchtetechnische Prüfungen an reinen Laborpräparaten ermöglichen die Beurteilung der Veränderung der hygrischen Eigenschaften von verschiedenen Beschichtungen mit zunehmender Beschichtungsanzahl und unter kontrollierten Untergrundbedingungen.

2.1 Bestimmung feuchtetechnischer Materialeigenschaften

In diesem Abschnitt werden die allgemein verwendeten Methoden zur feuchtetechnischen Charakterisierung der Prüfkörper sowie deren Präparation und Vorkonditionierung zur Prüfung beschrieben.

2.1.1 Präparation und Vorkonditionierung

Alle Prüfkörper (Putze, Ziegelscheiben, Bohrkerne) wurden seitlich mit Epoxid-Harz versiegelt. Durch den entstandenen geschlossenen Randbereich wurde der seitliche Feuchtetransport während der Messungen unterbunden. Darüber hinaus konnte ein Eindringen von hydrophob wirkenden Substanzen aus der Kittmasse, die zur Abdichtung der Prüfkörper im Prüfbehälter dient, verhindert werden.
Vor den Versuchen wurden die Proben im Normklima DIN 50014-23/50-2 bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte aufbewahrt. Die gravimetrische Bestimmung der Gewichtsveränderungen erfolgte bei allen feuchtetechnischen Untersuchungen mit einer Meßgenauigkeit von 0,01g.
Bei den abwechselnd durchgeführten Prüfungen der kapillaren Wasseraufnahme und der Wasserdampf-Diffusion wurden die Proben jeweils nach der kapillaren Wasseraufnahme 24 Stunden bei 40 °C getrocknet.

Bei einigen Untersuchungen wird gesondert auf eine Lagerung in Raum- oder Laborklima hingewiesen. Das Klima umfaßt Schwankungen von 45% - 60% rel. Luftfeuchte und 20 °C - 23 °C.

2.1.2 Wasserdampf-Diffusionswiderstand

Die Wasserdampf-Durchlässigkeit eines Trägers oder einer nicht filmbildenden Beschichtung (DIN 55 945) wird nach dem WTA Merkblatt 2-3-92 (Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.) mit dem Cup-Verfahren entsprechend DIN 52 615 bestimmt. Dazu wird die zu messende Probe auf einen mit Sorbens gefüllten Behälter gebracht und abgedichtet. Der konstante Wasserdampf-Diffusionsstrom durch die Probe stellt sich aufgrund unterschiedlicher Wasserdampfpartialdrücke unterhalb und oberhalb des Prüfkörpers ein. Die Wasserdampf-Durchlässigkeit eines Stoffes wird

a. Mit Hilfe der Diffusionswiderstandszahl µ (dimensionslose Materialkonstante), die besagt um welchen Faktor ein Stoff weniger dampfdurchlässig ist als eine gleich dicke ruhende Luftschicht und
b. Mit dem s_d-Wert (Produkt aus der Diffusionswiderstandszahl µ und der Schichtdicke des durchströmten Substrats) beschrieben.

Der s_d -Wert [m] beschreibt die Dicke einer ruhenden Luftschicht, die den gleichen Diffusionswiderstand aufweist wie die betrachtete Materialschicht. Detaillierte physikalische Grundlagen zu Diffusionsprozessen sind beispielsweise in KLOPFER 1974, SEIFERT 1982 und KIEßL 1983 zu finden. BAGDA 1988 beschreibt drei Methoden zur Bestimmung des Wasserdampf-Diffusionswiderstandes, die im Klimaschrank im Normklima DIN 50014-23/50-2 durchgeführt werden:

- Dry-Cup, unter Dampfdruckdifferenzen entsprechend 3% rel. Luftfeuchte zu 50% rel. Luftfeuchte (als Sorbens Blau- bzw. Silicagel)
- Wet-Cup I entsprechend 93% rel. Luftfeuchte zu 50% rel. Luftfeuchte (als Sorbens $NH_4(H_2)PO_4$)
- Wet-Cup II entsprechend ca. 100 % rel. Luftfeuchte zu 50% rel. Luftfeuchte (als Sorbens entionisiertes Wasser)

KÜNZEL 1994 und KRUS 1995 fordern, die Diffusionswiderstandszahl als echte Stoffkonstante aus dem Trockenbereich zu errechnen, da im höheren Feuchtebe-

reich zusätzlich zur Wasserdampf-Diffusion in einem die Porenwände auskleidenden Sorbatfilm Transportvorgänge in flüssiger Phase stattfinden. Die Bewegungsrichtung der flüssigen Phase hängt vom Gradienten der relativen Luftfeuchte in der gleichen Weise ab, wie der unterschiedliche Wasserdampfpartialdruck bei der Wasserdampf-Diffusion die Transportrichtung bestimmt. Unter isothermen Bedingungen verstärken sich beide Prozesse; bei einem Temperaturgefälle innerhalb des Probenquerschnitts kann der Flüssigkeitstransport der Diffusion entgegenwirken und die Stoffkonstante negativ beeinflussen.
In dieser Arbeit wird ausschließlich das Wet-Cup-Verfahren II angewandt, da das Dry-Cup-Verfahren zwar durch minimierte Fehlerquellen sogenannte echte Materialkonstanten liefert, dafür aber kaum den mitteleuropäischen Klimabedingungen entspricht (bzw. feuchtebelasteten Untergründen) und in Anbetracht des Ziels dieser Arbeit nicht für realistisch und daher irrelevant betrachtet wird. Bei der Durchführung der Messungen nach dem Wet-Cup-Verfahren II lassen sich weitere störende Einflüsse, die eine Vergleichbarkeit der Proben erschweren, durch die Lagerung unter isothermen Bedingungen eingrenzen.
Bei Bestimmung der Diffusionswiderstandszahl von Beschichtungsstoffen ist darauf zu achten, daß als Trägermaterial ein inertes Substrat (beispielsweise Glasfritten aus Borosilikatglas) verwendet wird, da der Diffusionsstrom durch eine Beschichtung von einer Vielzahl substratabhängiger Parameter beeinflußt werden kann. Sobald die Beschichtung weniger wasserdampfdurchlässig als der Träger ist, kann dessen Einfluß auf die Diffusionseigenschaften der Beschichtung allerdings vernachlässigt werden. Der größte Fehler tritt dann bei Abdichtungsungenauigkeiten auf.
Bei einem Großteil der Messungen in dieser Arbeit wurde im Gegensatz dazu gerade auf die *Substratabhängigkeit* unterschiedlicher Beschichtungen Wert gelegt. Die Beschichtungen wurden als Verbund mit dem Träger zusammen geprüft. Sofern nicht die Möglichkeit besteht, unter konstanten kontrolliert-klimatischen Bedingungen zu messen, sind weitere im Folgenden beschriebene Parameter zu berücksichtigen.

Messungen:

Die Prüfkörper wurden mit einem Wulst aus Dichtungsmasse (Terostat der Fa. Teroson) ummantelt, auf den mit Wasser gefüllten Prüfbehälter (PU–Dosen) gesetzt und nach unten streichend abgedichtet. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, daß sich keine Dichtungsmasse an der Probenunterseite befindet, die die Diffusionsfläche unkontrolliert verkleinern würde (Abbildung 1). Die Diffusionsexpe-

rimente erfolgten im Klimaschrank im Normklima DIN 50014-23/50-2.
Nach Einstellen des Diffusionsstrom-Gleichgewichts zwischen Probenbehälter und Außenklima wurde die Gewichtsdifferenz gravimetrisch über mindestens 7 Tage ermittelt.
Im Gegensatz zu diesen Experimenten konnten die Proben der Diffusions-Dauermessung während der Carbonatisierung von Kalkputzen nur im Raumklima unter genauer Aufzeichnung der Klimaschwankungen und Luftdruckänderungen gelagert werden.
Die relativ dampfdiffusionsoffenen Kalksysteme verlangen eine detailliertere Beobachtung der Klimaänderungen, da sich selbst geringe Schwankungen innerhalb sehr kurzer Zeiträume bemerkbar machen. So ließen sich bei einer spontanen Erhöhung der Raumluftfeuchte noch am selben Tag geringere Diffusionsströme feststellen (siehe Abbildung 2). Die Auswertung (Auszug im Anhang) bezieht sich daher für jeden Tag einzeln auf die von Temperatur und Feuchtigkeit und den jeweiligen Tages-Luftdruck abhängigen Dampfdruckdifferenzen, bzw. Diffusionsstromänderungen.

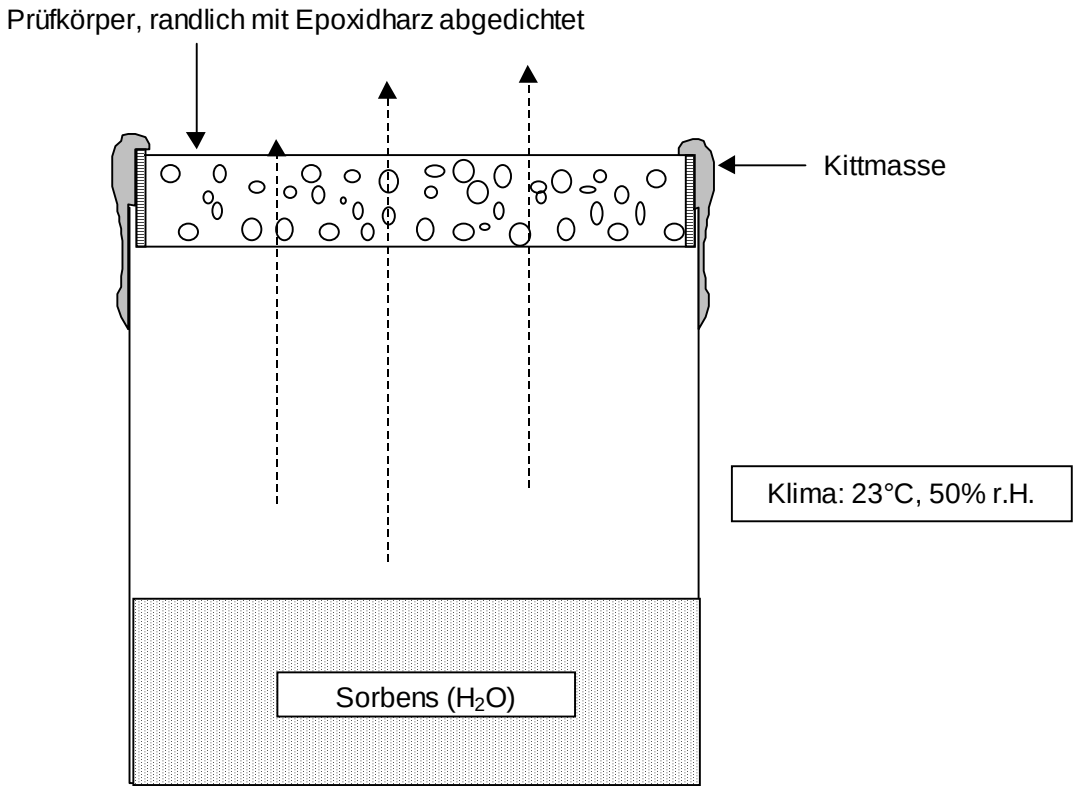


Abb. 1: Meßzelle zur Bestimmung der Wasserdampf-Durchlässigkeit.

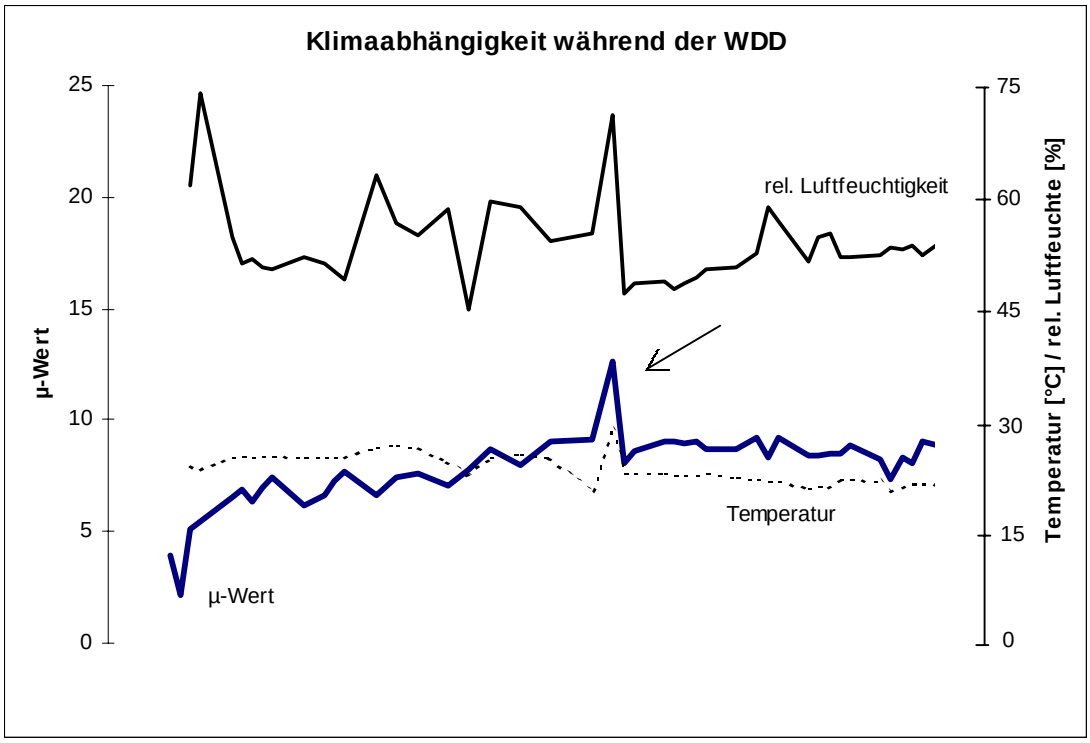


Abb. 2: Exemplarische Darstellung zur Klimaabhängigkeit der WDD-Messung. Der Pfeil verdeutlicht den starken Einfluß von Klimaschwankungen (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) auf den Diffusionsstrom (dicke Linie) durch einen porösen Prüfkörper.

Bei den Messungen mit konstanten Parametern in der Klimakammer ist die Auswertung deutlich vereinfacht. Nach DIN EN 1062-2 (Entwurf) wird nur die konstante Wasserdampf-Diffusionsstromdichte berechnet und als Maß angegeben.

Berechnungen und Anmerkungen zum Wasserdampf-Diffusionsdauerversuch unter wechselnden Klimabedingungen:

Die zeitliche Gewichtsveränderung der Proben, bedingt durch den sich einstellenden Wasserdampf-Diffusionsstrom I [g/h] ergibt auf die Fläche von 1 m^2 bezogen, die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte i [g/(m^2·h)].

In Anlehnung an das 1. Fick'sche Gesetz wird der Permeationskoeffizient [g/(m·h·Pa)] errechnet:

$$\delta = \frac{i \cdot d}{p_1 - p_2}$$

i: Wasserdampf-Diffusionsstromdichte [g/(m^2·h)]
δ: Permeationskoeffizient [g/(m·h·Pa)]
d: mittlere Dicke der Probe [m]
p_1-p_2: Differenz der Partialdampfdrücke auf der Probenober- und –unterseite [Pa]

Die Dampfdruckdifferenz p_1-p_2 ist von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig. Die Wasserdampfpartialdrücke p_1/p_2 lassen sich unter Zuhilfenahme der Werte für den Wasserdampfsättigungsdruck in Tabelle 2, DIN 4108 T5 durch Multiplikation mit der relativen Luftfeuchte ermitteln:

$$p_1 = \varphi_1 \cdot p_s$$
$$p_2 = \varphi_2 \cdot p_s$$

$\varphi_{1;2}$: rel. Luftfeuchte außerhalb und innerhalb des Gefäßes
p_s: Wasserdampfsättigungsdruck unter der jeweiligen Temperatur

Die Diffusionswiderstandszahl μ (dimensionslos) gibt das Verhältnis des Permeationskoeffizienten von Wasserdampf in der Luft und Wasserdampf in der Probe wieder:

$$\mu = \frac{\delta_L}{\delta}$$

δL: Permeationskoeffizient von Wasserdampf in der Luft [g/(m·h·Pa)]
δ: Permeationskoeffizient von Wasserdampf in der Probe

Der Permeations- oder Wasserdampf-Diffusions-Leitkoeffizient δ_L von Wasserdampf in Luft ist unter anderem von Luftdruck und -temperatur abhängig. Im Merkblatt 2-3-92 des WTA wird bei 23 °C der Permeationskoeffizient von Wasserdampf in Luft mit $702 \cdot 10^{-6}$ g/(m·h·Pa) angegeben. Dies entspricht einem Atmosphärendruck im Normzustand von 1013,25 hPa (siehe DIN 52 615, Abb. 2, S.5).

Bei der Messung von hoch durchlässigen Systemen in wechselndem Klima ist es unerläßlich, den jeweiligen Tagesatmosphärendruck sowie Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in die Berechnung mit einfließen zu lassen. Nach DIN 52 615 muß bei Prüfkörpern, die einen s_d-Wert <1 m aufweisen, zusätzlich die Luftschichtdicke (d_L) zwischen Sorbens und Prüfkörper in die Berechnung mit eingehen.

$$\delta_L = \frac{D}{R_D \cdot T} \qquad \delta_L = \frac{0{,}083}{R_D \cdot T} \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \left(\frac{T}{273{,}15} \right)^{1{,}81}$$

D: Wasserdampf-Diffusionskoeffizient in m^2/h
R_D: Gaskonstante des Wasserdampfes (462 Nm/kg K)
T: Temperatur
p_0: Atmosphärendruck im Normzustand (1013,25 hPa)
p: mittlerer Luftdruck im Klimaraum oder Labor [hPa]

$$\mu = \frac{1}{d} \cdot \delta_L \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{i} - d_L$$

d_L: mittlere Luftschichtdicke im Prüfgefäß unter der Probe [m] (siehe oben)

Wird die Diffusionswiderstandszahl µ wieder in Bezug zur Proben- bzw. Beschichtungsdicke d gesetzt, erhält man den s_d-Wert (Wasserdampf-Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke) [m]:

$$sd = \frac{\mu}{d}$$

Solange ein Konstantklima gewährleistet werden kann, stellt die Auswertung nach DIN EN 1062-2 ein einfaches Verfahren für die meisten bauphysikalischen Untersuchungen dar. Sollte kein Raum mit einem konstanten Klima zur Verfügung stehen, müssen die Klimaschwankungen mit Hilfe eines speicherfähigen Messgerätes, bei sehr dampfdiffusionsoffenen Systemen auch die Luftdruckwerte festgehalten und das genaue Auswertverfahren nach DIN 52 615 angewendet werden.

2.1.3 Trocknungsgeschwindigkeit

Alle Untersuchungen zur Trocknungsgeschwindigkeit wurden innerhalb einer Versuchsreihe an gleich hohen, seitlich mit Epoxidharz abgedichteten Prüfkörpern durchgeführt. Die Probenunterseite wurde gegen einen undurchlässigen Boden mit einer Dichtmasse (Terostat) versiegelt, so daß der Feuchtestrom ausschließlich über die Probenoberfläche entweichen konnte. Die Prüfkörper wurden bei 23 °C,

50% relativer Luftfeuchte und einer Luftbewegung von 1 m/sec im Klimaschrank getrocknet.

Messungen:

Nach der Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme wurden die bereits größtenteils wassergesättigten Proben mindestens 12 Stunden unter völliger Wasserbedeckung gelagert. Danach wurden die wassergesättigten Proben kurz abgetupft, mit der Unterseite auf einen PU-Untersatz gestellt und mit Dichtungsmasse abgedichtet. Kleinformatige poröse Prüfkörper mussten über zwei Tage stündlich gewogen werden. Bei den Ziegel-Bohrkernen reichte es aus, nach anfänglich stündlicher Wägung anschließend 14 Tage lang täglich zu wiegen.

Auswertung:

Nach KRISCHER 1992 und NERGER 1995 läßt sich der Trocknungsvorgang eines kapillarporösen Körpers in drei Abschnitte unterteilen:

1. Verdunstung des Oberflächenwassers mit annähernd konstant hoher Geschwindigkeit und kontinuierlichem kapillarem Nachschub aus dem Probeninneren (bis der Wasserfilm reißt).
2. Verdunstung des in den Kapillaren befindlichen Wassers mit abnehmender Geschwindigkeit. Durch das stärker werdende Feuchtigkeitsgefälle im Probeninneren wird der kapillare Transport zur Oberfläche geringer. Der Flüssigkeitsspiegel wandert ins Baustoffinnere und die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt in diesem Abschnitt stark ab.
3. Trocknung des Wassers aus den Porenwänden über Oberflächen- und später ausschließlich Wasserdampf-Diffusion mit sehr geringen Geschwindigkeiten.

Die gleichbleibende Trocknungsgeschwindigkeit des ersten Trocknungsabschnitts ist nur von den äußeren Bedingungen (Klima, Luftbewegung) abhängig, während der zweite Abschnitt ausschließlich durch die kapillaren Eigenschaften des Trocknungsgutes bestimmt wird. Die Feuchtigkeit wird über kapillaren und diffusiven Wassertransport abgegeben. Bei Unterschreiten des kritischen Wassergehaltes kommt der kapillare Wassertransport zum Erliegen, und es tritt nur noch Oberflächen- und Wasserdampf-Diffusion auf. Dieser dritte Trocknungsabschnitt hängt von den Diffusions- und Wärmeleiteigenschaften des Prüfkörpers sowie den äußeren Bedingungen ab. Wird die Trocknungsgeschwindigkeit v_t (in dieser Arbeit: kg/m^2*h; v. Böttger 1997 als Wasserabgabekoeffizient bezeichnet) über die Oberfläche gegen die jeweilige prozentuale Probenfeuchte (gemessen an

der maximalen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck) aufgetragen, lassen sich die drei Abschnitte innerhalb des Trocknungsverlaufs meist gut erkennen. Bei gleicher Austrocknungsgeschwindigkeit wird der Feuchtigkeitsgehalt einer Probe am Knickpunkt durch die Probendicke bestimmt (aus unterschiedlichen Dicken ergibt sich die charakteristische Knickpunktkurve nach KRISCHER 1992). Da in dieser Arbeit ausschließlich Proben mit identischen Abmessungen zum Vergleich herangezogen wurden, geht die Dicke nicht in die Darstellung mit ein. So können die Trocknungsverläufe gleich dicker, unterschiedlich kapillarporöser Prüfkörper direkt miteinander verglichen werden.
In dieser Arbeit findet eine weitere Darstellung Anwendung:
Bei allen untersuchten Proben liegt der zweite Trocknungsabschnitt im Bereich der Probenfeuchte zwischen 50% und 75% des maximalen Wassergehaltes. Da dieser Trocknungsabschnitt ausschließlich durch die kapillaren Poreneigenschaften des Trocknungsgutes bestimmt ist und dort die größten Geschwindigkeitsdifferenzen auftreten, wird dieser Feuchtebereich in Form von Spannweitendiagrammen zum Vergleich der jeweiligen Trocknungsgeschwindigkeiten herangezogen.

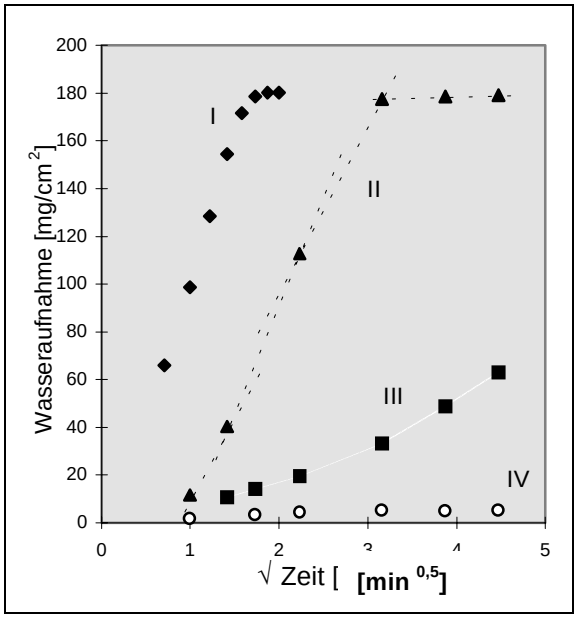
2.1.4 Kapillare Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme wurde in Anlehnung an DIN 52 617 ermittelt. Sofern nicht ausdrücklich auf ein Abweichen hingewiesen ist, erfolgte die siebentägige Vorkonditionierung der Prüfkörper laut DIN EN 1062-3 bei 23 °C und 50% rel. Luftfeuchte. Die seitlich mit Epoxidharz abgedichteten Proben wurden vor der Prüfung genau gewogen und anschließend auf wassergesättigten Schaumstoff gestellt, so daß die saugende Fläche ca. 3 mm tief im Wasser stand. Je nach Durchlässigkeit des Prüfkörpers erfolgte die gravimetrische Bestimmung der flächenbezogenen Wasseraufnahme W [kg/m^2] in unterschiedlichen Zeitintervallen jeweils nach Abtupfen der Saugfläche. Stark saugfähige Prüfkörper, wie unbeschichtete, mit Kalk oder mit Kalk-Kasein (niedrig konzentriert) beschichtete Mörtelproben wurden in Abständen von 30 s, 60 s oder 120 s gewogen. Die weniger saugfähigen Prüfkörper, wie die hochkonzentrierten Kalk-Kasein und die Leinöl beschichteten Mörtelproben sowie die beschlämmten Ziegelbohrkerne wurden in Abständen von 10 min gewogen.

Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten (Wasserdurchlässigkeitsrate) w erfolgt nach der Gleichung:

$$w = \frac{W}{\sqrt{t}} \left[\frac{kg}{(m^2 \cdot \sqrt{h})}\right]$$

Der w-Wert ergibt sich grafisch aus dem linearem Steigungsabschnitt der Wasseraufnahme W in Abhängigkeit von der Wurzel aus der Zeit.
Beschichtete Systeme zeichnen sich aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Beschichtung und Träger durch einen anfangs nicht linearen Verlauf aus. Daher ist es üblich, in diesen Fällen entweder den gemittelten w-Wert nach 24 Stunden (w_{24}), oder bei früherer Sättigung nach kürzerer Zeitdauer (w_x; über die gesamte Steigung) anzugeben. Die geprüften Verbundsysteme Putz / Beschichtung in Kapitel 4 erreichten teilweise aufgrund durchlässiger Beschichtungen und kleiner Prüfkörperformate innerhalb von wenigen Minuten den Sättigungsbereich. Ein konstant bleibender w-Wert war somit nicht zu ermitteln. Aus diesem Grund wird hier auf die Angabe eines w-Wertes verzichtet und statt dessen die zeitabhängige Veränderung des w-Wertes in Form von Diagrammen beschrieben. In Abbildung 3 ist das Wasseraufnahmeverhalten unterschiedlich durchlässiger beschichteter Systeme exemplarisch dargestellt.
Aufgrund der wechselnden Steigung nach jedem Zeitabschnitt ergibt sich ein ständig veränderter w-Wert. Das Abfallen der w-Werte der stärker durchlässigen Systeme I und II weist auf die zunehmende Sättigung der Probe hin. Für Vergleichszwecke ist demnach nur der Abschnitt vor dem Abfallen der Werte relevant. Die etwas dichteren Systeme III und IV zeigen bereits einen über diese Zeitdauer annähernd konstanten w-Wert.



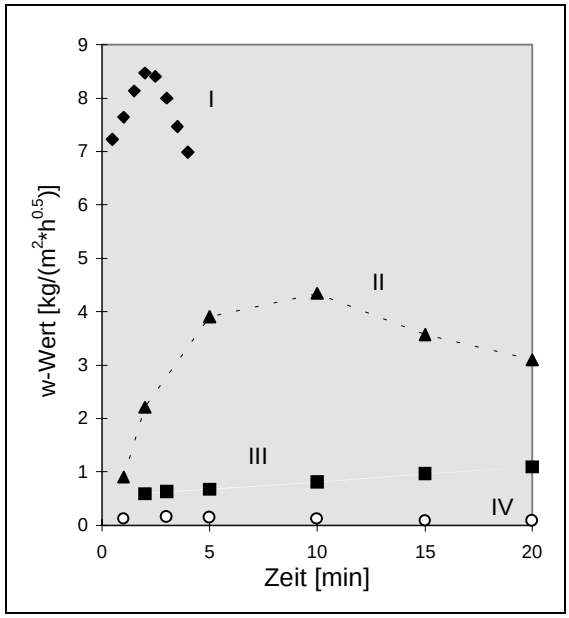


Abb. 3: Vergleich der nicht linearen Wasseraufnahme unterschiedlich durchlässiger Systeme (linke Darstellung) mit dem entsprechenden w-Wert (rechte Darstellung). Das Abfallen der w-Werte der beiden stärker durchlässigen Systeme I und II entspricht dem Erreichen des Sättigungsbereiches der Probe (horizontaler Kurvenabschnitt).

Abbildung 4 zeigt den anfänglichen Einfluß von Quellvorgängen, wie z.B. bei einer Leinölbeschichtung.

Diese Phänomene sind nur in einem geringen w-Wertbereich nachzuweisen. In Fall V nimmt der Wasseraufnahmekoeffizient w mit der durch den Quellvorgang induzierten Verdichtung ab, um später mit vermutlich zunehmendem Untergrundeinfluß wieder anzusteigen. In Fall VI nimmt die Beschichtung erst etwas mehr Wasser auf, quillt und schirmt zunehmend den Einfluß des Trägers ab.

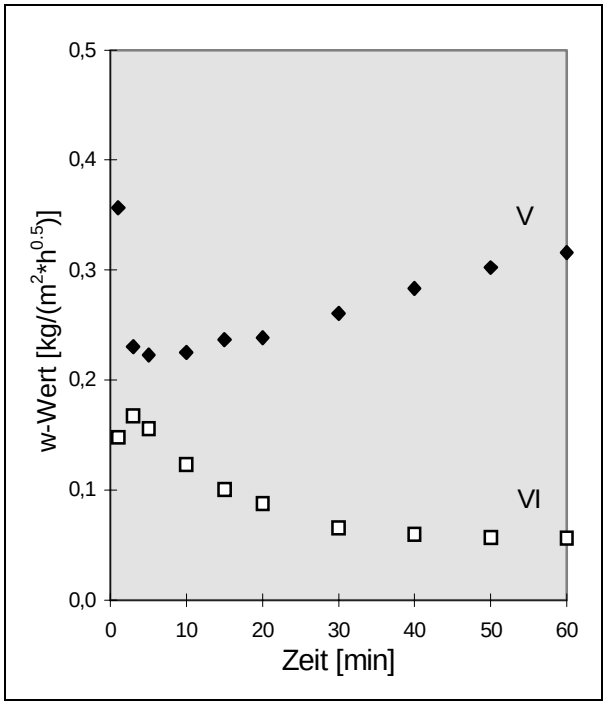


Abb. 4: Auswirkungen des anfänglichen Quellens einer quellfähigen Beschichtung auf den w-Wert in Abhängigkeit von der Zeit.

Kapillare Wasseraufnahme mit dem Karstenröhrchen:

Die kapillare Wasseraufnahme wurde direkt am Objekt mittels Karstenscher Prüfröhrchen (KARSTEN 1983) zerstörungsfrei bestimmt. Über das Auswerteprogramm ‚Calkarow' lassen sich der kapillare Wasseraufnahmekoeffizien w und der dazugehörige Eindringkoeffizient B bestimmen (WENDLER & SNETHLAGE 1998).
Zusätzlich findet ein leicht verändertes Auswerteverfahren nach NIEMEYER et al. 2000 Anwendung. Dieses Verfahren unterscheidet sich von dem Auswerteverfahren Calkarow' durch die Änderung eines Terms.
Die Gleichung (3) nach WENDLER & SNETHLAGE 1989, in der die Volumenanteile des zentralen Zylinders und des umgebenden Viertel-Torus addiert werden,

$$V(t) = \pi \cdot r^2 \cdot x(t) + \frac{\pi^2 \cdot r \cdot x(t)^2}{2} + \frac{\pi^2 \cdot x(t)^3}{4}$$

unterscheidet sich von der Formel nach NIEMEYER et. al 2000 durch den letzten Term:

$$V(t) = \pi \cdot r^2 \cdot x(t) + \frac{\pi^2 \cdot r \cdot x(t)^2}{2} + \frac{2\pi \cdot x(t)^3}{3}.$$

Dadurch weichen die errechneten w-Werte innerhalb beiden Auswerteverfahren etwas voneinander ab. Desweiteren wird der Kurvenverlauf der Messungen in Abhängigkeit der gewählten B-Wert-Intervalle grafisch dargestellt und ist damit übersichtlicher. Die kapillare Wasseraufnahme ist in drei verschiedenen Arten von Diagrammen veranschaulicht:

- Spannweitendiagramme:
  Aufgrund der unterschiedlich starken kapillaren Wasseraufnahme der beschichteten Proben und der daraus resultierenden frühen Sättigung einiger Systeme, wurden für den Anfangs- und Endwert der Spannweite der Wasseraufnahmekoeffizienten verschiedene Zeiten in Abhängigkeit vom Beschichtungssystem gewählt.

	Kalk	Kasein min.	Kasein max.	Leinöl min.	Leinöl max.
Anfangswert	1 min.	1 min.	1 min.	5 min.	5 min.
Endwert	5 min.	5 min.	5 min.	35 min.	35 min.

- Punktdiagramme:
  In der Darstellung sind jeweils die Endwerte der oben genannten Spannweiten zusammengefaßt.

- Verlaufsdiagramme:
  Hier ist der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahmekoeffizienten über die jeweilige Meßeinheit detailliert festgehalten. So läßt sich beispielsweise charakteristisches Ab- und Zunehmen der w-Werte im Verlauf der Zeit verdeutlichen.

Bei sehr dünnen Prüfkörpern (beispielsweise den in Abschnitt 3.1.4 aufgeführten beschichteten Ziegelplättchen 5 x 5 x 0,5 cm) wurde ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme angewandt. Die seitlich abgedichteten Probeplättchen wurden ebenfalls mit der Saugfläche auf wassergesättigten Schaumstoff gelegt. Danach wurde die Zeit notiert, sobald eine vollständige Durchfeuchtung der Probenrückseite festgestellt werden konnte. Die Dauer dieses Vorgangs lieferte bereits gute Aussagen und Vergleichsmöglichkeiten über die kapillare Wasseraufnahmefähigkeit verschiedener Prüfkörper, da die Dicke und die Fläche bei allen Probeplättchen identisch waren. Nach SATTLER et al. 1989 lassen sich bei der Kenntnis des w-Wertes des Untergrundes näherungsweise die w-Werte der Beschichtungen berechnen.

2.1.5 Sorptionsfeuchte

Die Prüfung der hygroskopischen Wasseraufnahme erfolgte nach DIN 50 008-1 in geschlossenen Kammern bei definierten Luftfeuchten über gesättigten Salzlösungen. Nach der Trocknung bei 105 °C wurden die Proben bis zur Gewichtskonstanz in der jeweiligen Luftfeuchte gelagert und der Sättigungswert gemessen an der maximalen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Sättigung $_{atm}$.) oder Vakuum (Sättigung $_{vac}$.) berechnet.

2.2 Chemisch-mineralogische Analyseverfahren

2.2.1 Lichtmikroskopie (Durchlicht- und Auflichtverfahren)

Die polarisationsmikroskopische Untersuchung der historischen Mörtel wurde an einem Polarisionsmikroskop durchgeführt. Die Mörtel wurden in Epoxidharz eingebettet und maschinell auf 30 µm Dicke geschliffen. Die mikroskopische Untersuchung diente in erster Linie zur Ergänzung der im Folgenden beschriebenen Mörtelanalyse, um Muschelanteile historischer Kalkmörtel per Point Counter vom umgebenden Kalkmörtel zu unterscheiden und abzuziehen, bzw. dem Zuschlag zuordnen zu können. Die gewonnenen Werte sind als halbquantitativ zu bezeichnen.
Anhand des Auflichtverfahrens wurde die Oberflächenmorphologie der Schlämmenproben mit einem Stereomikroskop beurteilt und fotografiert. Zur besseren Ausleuchtung sowie der Erzeugung von Streiflicht diente eine Kaltlichtleuchte des Typs KL1500 electronic von Zeiss.

2.2.2 Rasterelektronenmikroskopie

Die klein gebrochenen Proben der mehrschichtigen Tünchepakete und die Oberflächenbereiche der Schlämmenbohrkerne sowie die beschichteten Putzproben wurden mit der zu untersuchenden Zone nach oben auf einen Tropfen Leitgraphit gedrückt und mit 2-3 kleinen Leitgraphit-Bahnen von der Probenoberfläche zum Träger verbunden. Diese Maßnahme diente sowohl zum Fixieren der Probe als auch dem Ableiten der Elektronen während der Bestrahlung. Zur Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop (Hitachi S-530) des Institutes für Mineralogie der Universität Hannover wurden die probenbesetzten Träger mit Gold bedampft. Die chemische Zusammensetzung ausgewählter Bereiche wurde mit einem energiedispersiven EDX-System (KEVEX 7000) ermittelt.

2.2.3 Röntgendiffratometrie

Mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (Phillips PW 1800, CuK -Stahlung) wurden am Institut für Mineralogie der Universität Hannover Weißkalkhydrat und getrockneter Sumpfkalk halbquantitativ miteinander verglichen. Dazu wurde jeweils die gleiche

Menge an Pulver in einen Probenhalter gepresst und unter gleichen Winkel- und Geschwindigkeits-Bedingungen gemessen. Die Höhe der äquivalenten $Ca(OH)_2$-Peaks geben Aufschluß über den relativen $Ca(OH)_2$-Gehalt des jeweiligen Bindemittels.

2.2.4 Salzanalyse

Die wasserlöslichen Salze (Ionen) wurden an einem Spektralphotometer (Dr. Lange Sp CADAS 100) des IfD bestimmt. Die Probe wurde zerkleinert und bei 105 °C getrocknet. Anschließend mußte sie in einem Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und danach 2 Stunden in einer definierten Menge entionisiertem Wasser gerührt werden. Der Rückstand wurde abfiltriert und anhand der Lösung der pH-Wert und die Leitfähigkeit (zur groben Abschätzung des benötigten Verdünnungsfaktors) ermittelt. Unter Umständen mußte je nach Ionensorte eine weitere Verdünnung vorgenommen werden. Natrium wurde mittels einer in 0,1 molaren Natriumchloridlösung vorkonditionierten Natriumelektrode bestimmt.

2.2.5 Mikrochemische Tests

Salzanalyse:

Die Ionen kleinster Salzmengen (abgenommene Pusteln, Salzrasen oder abgefallene Tüncheteilchen (aus Wandmalereibereichen) wurden noch nach von ARNOLD 1984 und BLÄUER-BÖHM 1994 qualitativ bestimmt. Bei diesen Verfahren werden charakteristische Kristallisations- und Farb-Reaktionen unterschiedlicher Ionen unter dem Mikroskop betrachtet.

Lose Salzkristalle wurden in wenig entionisiertem Wasser mit einer Pipette aufgenommen. Feste Partikel und Tünchestückchen wurden in eine Pipette gefüllt, in deren Spitze feine Watte gestopft war und in dem aufgenommenen Wasser etwas geschüttelt. Durch das Abgeben der Lösung durch die Watte wurde verhindert, daß feste Partikel den Test stören. Insgesamt sieben Tropfen dieser Lösungen wurden auf einem Objektträger nach folgenden Ionen sowie Gips untersucht:

- Cl^-: Bei Zugabe von Silbernitrat fällt bei Anwesenheit von Cl^- ein feiner weißer Niederschlag aus, der sich nach einiger Zeit verfärbt.
- Mg^{2+}: Ein Tropfen der Lösung wurde mit verdünnter HCl versetzt und anschlie-

ßend Natriumhydrogenphosphat- und Ammoniumhydrogenphosphatlösung dazugegeben. Danach mußte das Gemisch über einem mit konzentriertem Ammoniak gefüllten Uhrglas geräuchert werden. Die entandenen Magnesium-ammoniumphosphatkristalle zeigten zuerst die Form von Prismen und bildeten später Dendriten aus.

- $CaSO_4$: Bildeten sich in der eingedampften Lösung nach der Zugabe von 2 N HCl lange Nadeln, konnte davon ausgegangen werden, daß bereits in der unbehandelten Probe Gips vorhanden war.
- Ca^{2+}: Die ebenfalls eingedampfte Lösung bildete bei Anwesenheit von Ca^{2+} nach dem Versetzen mit 2 N Schwefelsäure lange Nadeln (Gips).
- SO_4^{2-}: War SO_4^{2-} vorhanden, entstanden bei Zugabe von Calciumchloridlösung zur eingedampften Lösung ebenfalls die langen Gipsnadeln.
- K^+: Zum Rückstand der eingedampften Lösung wurde etwas konzentrierte Schwefelsäure gegeben und das Gemisch vorsichtig mit einem daneben liegenden Bismutnitrattropfen verbunden. Bildeten sich am Übergang Kristalle in Form von Prismen und Nadeln (Kalium-Bismut-Sulfat), war vermutlich Kalium in der Ausgangslösung vorhanden.
- Na^+: Bildeten sich bei dem gleichen Test wie bei K^+ Sternchen und dreieckige Kristalle (Natrium-Bismut-Sulfat), so war vermutlich Natrium in der Ausgangslösung vorhanden.
- NO_3^-: Dazu wurde die eingedampfte Lösung mit ein paar Körnchen Diphenylamin und konzentrierter Schwefelsäure versetzt. Bei Anwesenheit von NO_3^- färbte sich der Tropfen blau.

Bindemittelanalyse:

Die mikrochemische Bindemittelanalyse wurde nach dem Verfahren von SCHRAMM & HERING 1988 vorgenommen. Hierbei lassen sich die Bindemittel anhand folgender einfacher mikrochemischer Gruppentests in Stoffklassen einteilen:

- Stickstoffhaltige Verbindungen (beispielsweise Proteine): Erhitzen mit CaO in einer Kapillare, Nachweis von gebildetem Ammoniak mit Indikatorpapier am Kapillarende.
- Leime: Erhitzen der Probe in einer Kapillare, Nachweis durch Rotfärbung einer Lösung von 4-N,N-Dimethylaminobenzaldehyd in Essigsäure am Kapillarende.
- Trocknende Öle: (Schaumtest): Probe mit wässrigem Ammoniak (ca. 25%) und wässriger Wasserstoffperoxidlösung (30%) in einem Uhrglas umsetzen. Bei

Anwesenheit von fetten Ölen Bildung eines stabilen Schaumpolsters.

- Glycerine: Erhitzen der Probe mit Natriumhydroxid in der Kapillare, Nachweis durch Blaufärbung einer wässrigen Lösung von Morpholin und Natriumnitro-pentacyanoferrat (II) am Kapillarende.
- Kohlenhydrate: Erhitzen der Probe mit Oxalsäure in der Kapillare, Nachweis durch Rotfärbung einer wässrigen Lösung von Anilinacetat am Kapillarende.
- Stärke: Blaufärbung in einer Iod-Kaliumjodid-Lösung.

Bei den Nachweisen muß beachtet werden, daß durch Alterung und Verwitterung eine Veränderung bzw. der Verlust ursprünglich vorhandener Bindemittel möglich ist. Desweiteren ist bei dem Verdacht auf Proteine zu bedenken, daß auch Stickstoff aus mikrobieller Herkunft die Probe kontaminieren kann.

2.2.6 Mörtelanalyse

Die Mörtelanalyse wurde in Anlehnung an das von WISSER & KNÖFEL 1987 und 1988 beschriebene Verfahren durchgeführt.
Aus der Carbonatbestimmung nach Scheibler richtet sich der Säureverbrauch nach dem Carbonatgehalt der Probe für die Mörtelanalyse:

Carbonatphasen (Ma%):	konz. HCl (Vol.-Teile):	H_2O (Vol.-Teile):
<35	1	3
35-50	1	2
50-75	1	1
75-100	2	1

Die Mörtelprobe wurde bei der Mörtelanalyse nach WISSER & KNÖFEL (1987 und 1988) grob zerkleinert und gewogen. Danach bei 40 °C und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und nach dem Abkühlen im Exsikkator gewogen (Trockengewicht A; durch Unterschiede im Gewicht zwischen beiden Trocknungs-gängen konnte in der Regel auf einen Gehalt an Gips ($CaSO_4$ $2H_2O$; beginnender Verlust des Kristallwassers) geschlossen werden). Anschließend wurde die Probe mit mind. der dreifachen Menge an Salzsäure verrührt. An der Intensität des Aufbrausens ließ sich ebenfalls gips- oder dolomithaltige Mörtel von reinen Kalkmörteln unterscheiden. Die Lösung wurde mind. 24 Stunden stehen gelassen (Lösung über dem Bodensatz mußte klar sein) und danach vorsichtig abgesaugt.

Der Rückstand wurde solange mit entmineralisiertem Wasser gewaschen, bis die Leitfähigkeit unter 100 µS gesunken war. Nachdem das Wasser vorsichtig abgesaugt wurde, wurde der Rückstand bei 105 °C getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und gewogen (Trockengewicht B). Der Rückstand wurde mit gesättigter Natriumcarbonatlösung versetzt und unter Rühren bis zum Sieden erhitzt. Die heiße Lösung mußte über einen Filter abgesaugt und 5 mal mit heißem Wasser sowie 5 mal mit heißer Salzsäure (5%ig) gewaschen werden. Anschließend wurde solange mit heißem Wasser nachgespült, bis die Leitfähigkeit unter 100 µS gesunken war. Der Rückstand wurde bei 105 °C getrocknet und im Exsikkator abgekühlt und gewogen (Trockengewicht C).

Die Auswertung wurde wie folgt durchgeführt:

$$\text{Bindemittelanteil [\%]} = \frac{\text{Trockengewicht A} - \text{Trockengewicht B} \cdot 100\%}{\text{Trockengewicht A}}$$

$$\text{Lösliche } SiO_2\text{-Anteile [\%]} = \frac{\text{Trockengewicht B} - \text{Trockengewicht C} \cdot 100\%}{\text{Trockengewicht A}}$$

$$\text{Zuschlag [\%]} = \frac{\text{Trockengewicht C} \cdot 100\%}{\text{Trockengewicht A}}$$

$$\text{Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis} = \frac{\text{Trockengewicht A} - \text{Trockengewicht C}}{\text{Trockengewicht C}}$$

Bei den historischen Mörteln aus dem Küstenbereich sind Muscheln als Zuschlag verwendet worden. Da diese größtenteils nach diesem Analyseverfahren in Lösung gehen und so dem Bindemittelanteil zugerechnet werden, ist eine Korrektur per mikroskopischem Auszählverfahren (s. o.) notwendig.

Mörtelanalyse für gipshaltige Mörtel:

Da die Mörtelproben aus dem Kloster Lüne in Lüneburg neben Kalk als Bindemittel hauptsächlich Gips enthielten, war eine erweiterte Untersuchung notwendig.

Die Mörtelproben werden grob zerkleinert und bei 40 °C gewogen. Danach wurde die Probe bei 250 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (bei dieser Temperatur wird der Verlust des Kristallwassers von Gips und anderer Salze erreicht) und nach dem Abkühlen im Exsikkator gewogen. 2-3 Proben wurden für die Carbonat-

Analyse nach Scheibler entnommen. Von den restlichen Proben wurde jeweils 3 g in 80 ml HCl (1:3) 24 Stunden stehengelassen. Nach 2 minütigem Kochen wurde der heißen Lösung 200 ml entmineralisiertes Wasser zugegeben und alles nochmals 2 Minuten aufgekocht. Die danach abgekühlte Lösung wurde mit 500 ml entmin. Wasser aufgefüllt. Nachdem sich der Niederschlag gesetzt hat, wurden 100 ml für die photometrische Sulfatbestimmung abpipettiert. Der Rückstand wurde dekantiert und solange gewaschen, bis die Lösung neutral reagierte. Diese wurde dann vorsichtig abgesaugt, der Rückstand bei 105 °C getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und gewogen. Die Probe wurde anschließend mit gesättigter Natrium-carbonatlösung versetzt und nach ca. 3 min unter Rühren zum Sieden gebracht. Nachdem die heiße Lösung abgesaugt war, wurde der Filterrückstand 5 mal mit heißem Wasser und 5 mal mit heißer Salzsäure gespült. Anschließend wurde solange mit heißem Wasser gewaschen, bis die Lösung neutral reagierte. Der Rückstand wurde bei 105 °C getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und gewogen.

Bestimmung der Korngrößenverteilung in Mörteln:

Nach den vorangehend beschriebenen Mörtelanalysen wurde anhand des Rückstandes die Siebanalyse mittels ISO Standard Sieben mit den Maschenweiten 63 µm, 125 µm, 250 µm, 500 µm, 1 mm, 2 mm und 4 mm durchgeführt.

2.2.7 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Untersuchung der Porosität und der Porenradienverteilungen der Mörtelpräparate sowie der körperhaften Schlämmen erfolgte am Hg-Druckporosimeter (Gerät: Micromeritics Autopore II 9220) das Instituts für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-GH Siegen. Die Proben wurden vorsichtig mit einem Hammer zerkleinert und auf eine Fraktion von 2-4 mm ausgesiebt. Danach erfolgte die Trocknung bei 40 °C bis zur Gewichtskonstanz. Die auf diese Weise vorbereiteten Proben wurden in Glasfläschchen verfüllt, verschlossen und mit heißem Wachs versiegelt, um eine Feuchtigkeitsaufnahme bis zur Messung zu unterbinden.

Die Feststellung der Porenverhältnisse einer Probe erfolgt durch den Druck gegen die Oberflächenspannung des Quecksilbers und den Randwinkel, der aufgewendet werden muß, um das Quecksilber in die Poren des porösen Körpers zu pressen.

Dabei wird zur Berechnung der Porenradien die Gleichung von WASHBURN 1921 zugrunde gelegt:

$$r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{p}$$

r = Porenradius
P = hydrostatischer Druck [N/m^2]
σ = Oberflächenspannung [N/m^2]
θ = Randwinkel

Bei der Bewertung der Porenradienverteilung mußte beachtet werden, daß der Radius der Poreneintrittsöffnung gemessen wird und sogenannte Flaschenhalsporen, die sich nach der Öffnung wieder weiten, nicht erfasst werden können.

3 Objektuntersuchungen

Beschichtungen, die vorwiegend aus Kalk bestehen, zeigen nicht nur aufgrund der variablen Zusammensetzung, sondern auch je nach Exposition und die dadurch gegebenen Rahmenbedingungen unterschiedliche Beständigkeiten. Es wäre nicht richtig zu behaupten, Kalkbeschichtungen seien grundsätzlich für den Außenbereich nicht geeignet. Beispiele bis heute existierender historischer Kalkmörtel belehren uns eines Anderen. Kalk als Baumaterial wird sicherlich stärker von den umgebenden Rahmenbedingungen beeinflusst als mancher moderner Baustoff. Das gilt sowohl für den Außen- wie auch für den Innenbereich. Gerade deswegen ist es von immenser Wichtigkeit, zusätzlich zu Laboruntersuchungen objektbezogene wissenschaftliche Daten aus Langzeitversuchen zu sammeln, zu beurteilen und Anforderungen an das Beschichtungssystem Kalk im Sinne von Normen und weiteren geeigneten Prüfverfahren zu entwickeln.

3.1 Kalkschlämmen als Schutz- und Verschleißschicht – Fallbeispiel Eilsum

In diesem Abschnitt werden feuchtetechnische Untersuchungen an 16 verschiedenen Schlämmensystemen vorgestellt, die auf der Ostwand der ev. ref. Kirche in Eilsum/Ostfriesland und auf unbelasteten Prüfkörpern zum Vergleich appliziert wurden. Dabei steht die zeitliche Entwicklung der einzelnen ‚Schlämmengruppen' und deren Funktionalität im Vordergrund.

3.1.1 Einleitung

Die alte Kirche in Eilsum ist ein einschiffiger Backsteinbau aus der ersten Hälfte des 13. Jahrhunderts mit einer Gesamtlänge von ca. 50 m. Sie ist reich an stilistischen und künstlerischen Besonderheiten wie z.B. dem für Ostfriesland ungewöhnlichen Chorturm, der Außengliederung des Schiffes, der großartigen Domikalgewölbe und nicht zuletzt der überregional bedeutenden mittelalterlichen Wandmalerei. Der Außenbau ist heute überwiegend steinsichtig, jedoch wird durch einige Reste früherer Kalkschlämmen belegt, daß die Kirche zumindest zeitweise eine Außenfassung trug.
Die problematischen Standortbedingungen in Küstennähe, extreme Wetterbela-

stungen und eine nicht immer ausreichende Bauunterhaltung führten über die Jahre zu gravierenden Schäden (siehe Schadensschema Abbildung 5).
Auf einer kleinen Warft gelegen, reicht das ursprünglich 60 cm tiefe Fundament heute 1,20 m tief in den dort stark feuchten Marschboden. Aufsteigende Mauerfeuchte und der Einfluss von salinaren Aerosolen (Meeresnähe) hat Jahrhunderte lang zu einer kontinuierlichen Anreicherung von bauschädlichen Salzen in dem durchschnittlich 1,40 m dicken Mauerwerk geführt. Nachdem 1974 eine Horizontalsperre eingezogen wurde, konnte der Feuchtestrom größtenteils unterbunden werden. An Bohrkernen ermittelte Salz- und Feuchtegehalte des Mauerwerks zeigen die positiven Folgen der Horizontalsperre heute deutlich. Unterhalb liegt die Feuchtigkeit (70-85% der Sättigungsfeuchte) sowie auch der Salzgehalt bis um den Faktor 10 höher als oberhalb der Horizontalsperre (SCHWARZ & RÖSCH 1993, NEUMANN 1993, BLÖCHL et al. 1996). Der Wassereintrag über die Fassaden ist jedoch weiterhin unerträglich hoch. Vor allem im Winterhalbjahr führt die starke kapillare Wasseraufnahme und das große Porenvolumen der ungeschützten historischen Backsteine zu extremen Belastungen durch Feuchte und Frost. Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf den historischen Befund wird daher schon seit längerem erwogen, mit Hilfe einer Schlämme einen sowohl wirksamen wie auch denkmalgerechten Feuchteschutz zu erhalten.
Die Entscheidung für oder gegen eine Schlämme, bzw. die Auswahl eines geeigneten Systems soll auf der Grundlage praxisorientierter Untersuchungen sowohl im Labor als auch an Testflächen erfolgen. Sie beziehen sich vor allem auf die feuchtetechnischen Eigenschaften und die Beständigkeit von insgesamt 16 größtenteils auf Kalk basierenden Testsystemen.

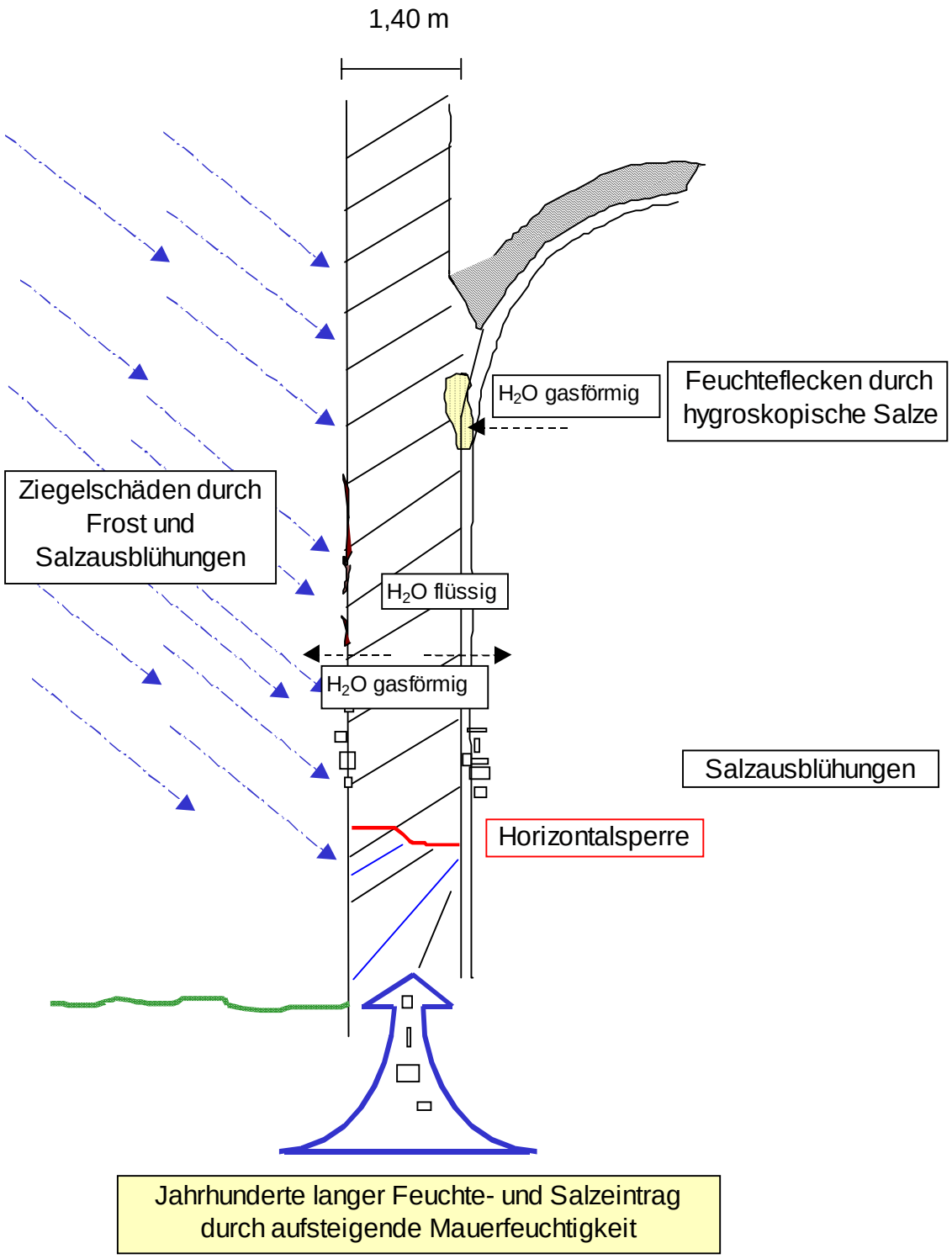


Abb. 5: Schadensschema des Mauerwerks der Kirche in Eilsum/Ostfriesland

3.1.2 Beschreibung der Testsysteme

Die Ziegelfassade der Kirche in Eilsum stellt einen äußerst inhomogenen Untergrund dar, insofern ist der Anspruch an die Schlämmen hoch. Rückgewitterte historische Ziegeloberflächen befinden sich in direkter Nachbarschaft zu intakten

alten, klinkerartigen und neuen Ziegeln sowie verschiedenen Fugenmörteln mit unterschiedlichsten Wasseraufnahmewerten, Haft- und Verformungseigenschaften. Hinzu kommt eine inhomogene, teilweise hohe Feuchte- und Salzbelastung.

Da der Begriff ‘Schlämme’ zur Zeit noch keiner festen Definition nach DIN oder anderen Regelwerken unterworfen ist, wurden für diese Untersuchungsreihe neben mehrlagigen ’Dünnputzen’ (Dicken von 3-10 mm, MEYER 1993) auch Beschichtungen mit ‘Anstrich’charakter aufgenommen, die eine Schichtdicke von ca. 400 µm aufweisen, jedoch ebenfalls mehrlagig appliziert werden. Die unterschiedlich dicken Systeme (siehe Tabelle 1) variieren in der Stärke der Wasserabweisung und sind teilweise auch im Sinne einer Opferschicht mit gewissen ‘Salzaufnahmekapazitäten’ konzipiert worden. Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand muß bei allen Schlämmen niedrig sein.

Von 16 getesteten Systemen sind 12 im wesentlichen an historischen Rezepturen orientiert und wurden von Restauratoren entwickelt. Die 4 restlichen Systeme sind industriell hergestellte Produkte. In Abbildung 6 ist zur Orientierung die Abfolge der verwendeten Bindemittelsysteme auf dem östlichen Wandabschnitt der Kirche in Eilsum dargestellt. Aus Tabelle 1 lassen sich die jeweiligen Bindemittel und Zuschläge sowie die Applikationsfolgen der einzelnen Schlämmensysteme entnehmen.

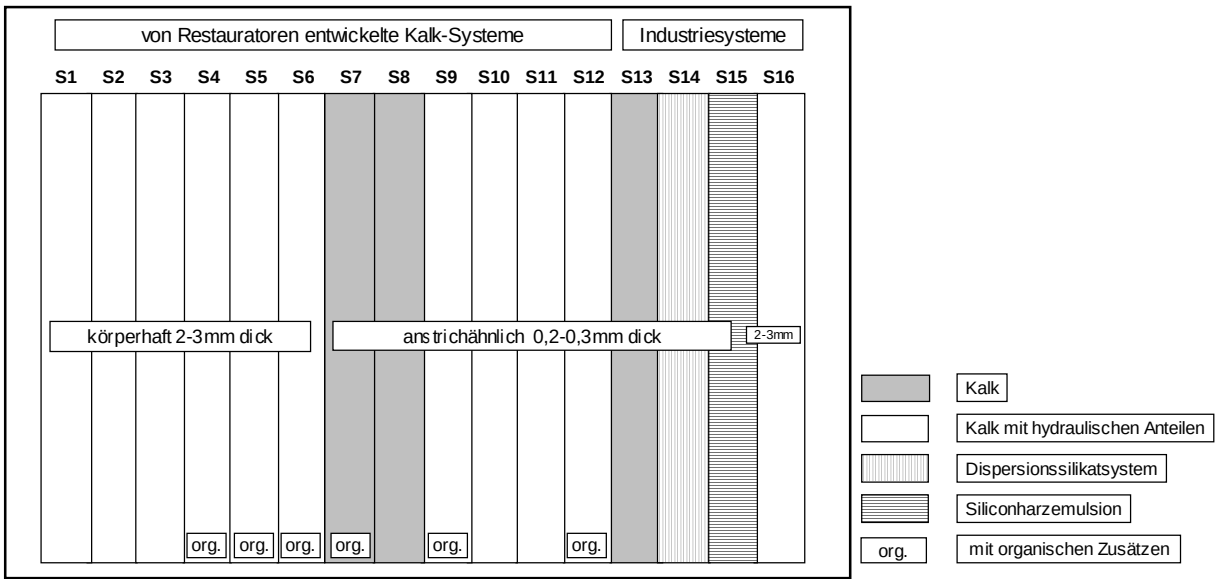


Abb. 6: Überblick der unterschiedlichen Bindemittelsysteme der Testschlämmenstreifen, aufgetragen an der Ostwand der ev. ref. Kirche in Eilsum.

3.1.3 Vorbehandlung des Untergrundes und Applikation

Für die Vorbehandlung der Untergründe im Bereich der Musterflächen wurde weder ein Steinaustausch noch eine Steinfestigung, sondern ausschließlich eine Reinigung der Steinoberfläche, die Entfernung schadhafter Fugen, deren Ersatz und partielle Anböschungen vorgenommen. Um einen vergleichbaren Untergrund zu schaffen, wurden die Arbeiten für alle Testflächen analog ausgeführt.
Mit Hilfe einer kontrollierten Druckwasseranwendung (kalt) wurden Schmutzkrusten und lose Partikel mechanisch von der Ziegelfassade entfernt und eine Tragfähigkeit für folgende Beschichtungen geschaffen. Verwitterungsspuren an den Ziegeln (Schollen- und Rissbildung) wurden durch Anböschungen überspannt, fixiert und gewährleisten eine verbesserte Wasserabfuhr. Schadhafte Fugen wurden mit einem Mörtel aus Sumpfkalk, Quarzsand und hydraulischen Zusätzen (Ziegelsplitt etc.) ausgebessert, der je nach Einsatzgebiet (Fugen- oder Steinbereich) mit Pigmenten eingefärbt wurde. Vor den Ausbesserungsarbeiten wurde das Mauerwerk vorgenässt. Alle Anböschungen und Neuverfugungen sind vor dem Auftrag der Schlämmen oberflächlich nachgekratzt bzw. aufgebürstet worden, damit evtl. Sinterhäute nicht die Bindung zwischen Anträgen und Schlämmen behindern. Vor dem Auftrag der dickeren Schlämmen wurden die Ziegel leicht vorgenässt. Alle drei Schlämmschichten wurden im Abstand von einem Tag mit dem Quast aufgetragen, wobei der erste Auftrag bereits gröbste Unebenheiten ausgleicht. Anschließend wurden die beschichteten Bereiche mit einer Folie abgehängt, um einer zu schnellen Austrocknung der Systeme vorzubeugen. Die einzelnen Schichten der Schlämmen mit Anstrichcharakter wurden mit einem Pinsel (kleinem Quast) intensiv einmassiert und Schlämme S8 und S11 anschließend mit Kalksinterwasser besprüht. Die Industrieprodukte S13, S15 und S16 wurden von Restauratoren entsprechend der angegebenen Herstellerinformationen mit dem Pinsel, S14 vom Hersteller selbst appliziert. Parallel zu diesen Arbeiten wurden für Laborprüfungen in identischer Abfolge die 16 Systeme auf 50x50x5 mm große Plättchen aus dem Austauschziegelmaterial aufgetragen. Die Applikationsoberfläche besteht aus dem Innenbereich des Ziegels, dessen kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient bei ca. 18 $kg/(m^2 \cdot \sqrt{h})$ liegt und somit dem der geschädigten Bereiche der Ziegelfassade ähnelt. Zur Carbonatisierung verblieben die Probeplättchen vor Ort.

Tabelle 1: Grobe Zusammensetzungen der Testschlämmen:

	Schicht-dicke [mm]	Zusammensetzung	System und Systemaufbau
S1	2-3	Quarz-und Schamottmehl, Billerbecker Kalk, Sumpfkalk, Pigmente	Schlämme mehrschichtig (3-lagig)
S2	2-3	Quarz-und Schamottmehl, Sumpfkalk, Pigmente	Schlämme mehrschichtig (3-lagig)
S3	2-3	Quarz-und Schamottmehl, Sumpfkalk, Pigmente	Schlämme mehrschichtig (3-lagig)
S4	2-3	Quarz-und Schamottmehl, Billerbecker Kalk, Sumpfkalk, Pigmente, Leinöl	Schlämme mehrschichtig (3-lagig)
S5	2-3	Quarz-und Schamottmehl, Sumpfkalk, Pigmente, Leinöl	Schlämme mehrschichtig (3-lagig)
S6	2-3	Quarz-und Schamottmehl, Sumpfkalk, Pigmente, Leinöl	Schlämme mehrschichtig (3-lagig)
S7	0,1-0,3	Kasein, Sumpfkalk, Zwischen- u. Endlasur pigmentiert	Anstrich mehrschichtig (Grundierung, 1x Zwisch.-fassung, 1x Endlasur)
S8	0,1-0,3	Sumpfkalk, Zwischenanstrich u. Endlasur pigmentiert	Anstrich mehrschichtig (Grundierung, 2x Zwisch.-fassung, 3x Endlasur)
S9	0,1-0,3	Kalkhydrat, Zwischenanstrich. u. Endlasur pigmentiert	Anstrich mehrschichtig (Grundierung, 2x Zwisch.-fassung, 3x Endlasur)
S10	0,1-0,3	Sumpf.-u. Kalkhydrat, Leinöl, Kasein; Endanstrich pigmentiert + Siloxan,	Anstrich mehrschichtig (Grundierung, 2x Zwisch.-fassung, 1x Endanstrich)
S11	0,1-0,3	Sumpf.-u. Kalkhydrat, feiner Sand; Endanstrich pigmentiert + Ziegelmehl	Anstrich mehrschichtig (Grundierung, 1x Zwisch.-fassung, 3x Endanstrich)
S12	0,1 - 0,3	Sumpfkalk, Leinöl, Ziegelmehl alle Schichten pigmentiert	Anstrich mehrschichtig (Grundierung, 1x Zwisch.-fassung, 1x Endanstrich)
S13	0.1 - 0,3	mineralisches System auf Kalkbasis, anorganische Füllstoffe, Pigmente	Anstrich mehrschichtig (Grundierung und Schlußanstrich)
S14	0,1 - 0,3	Dispersions-Silikatsystem, anorganische Füllstoffe, Pigmente	Anstrich mehrschichtig (Grundierung und Schlußanstrich)
S15	0,2 - 0,3	Siliconharzemulsion, anorganische Füllstoffe, Pigmente	Anstrich mehrschichtig (Grundanstrich und Schlußanstrich)
S16	1 - 2	Kalk, Trass, anorganische Füllstoffe	Schlämme einschichtig

von S1-S3, bzw. S4-S6 leicht zunehmend hydraulische Anteile; genaue Rezepturen im Anhang)

3.1.4 Naturwissenschaftlich-denkmalpflegerische Analyse einfacher und komplexer Kalksysteme

In diesem Kapitel werden vergleichende Untersuchungen an Laborpräparaten und Bohrkernen mit einem Durchmesser von 5 cm aus der Testfläche nach 2½ Jahren Bewitterungsdauer vorgestellt.

3.1.4.1 Durchgeführte Untersuchungen – Überblick

In Abbildung 7 sind alle durchgeführten Untersuchungen schematisch dargestellt.

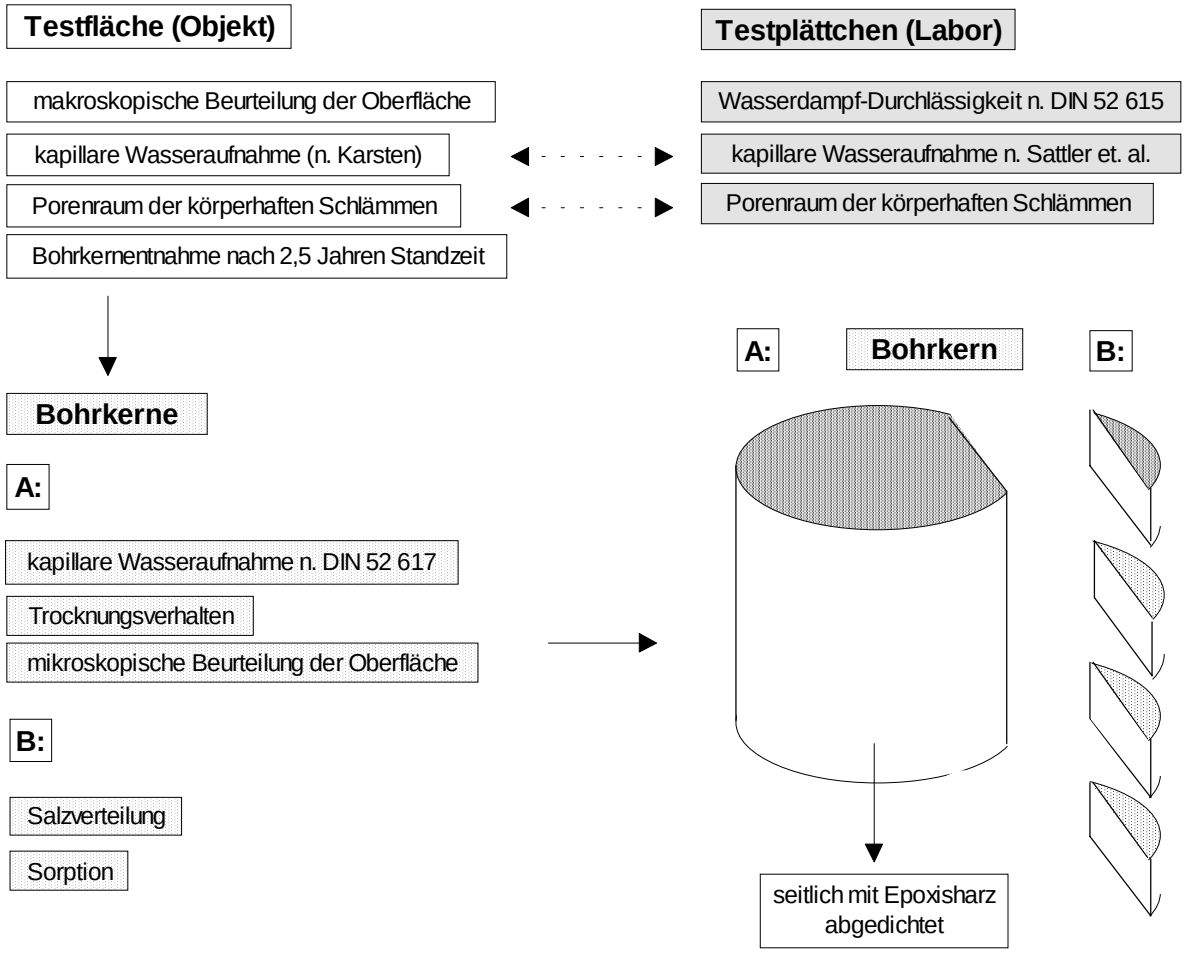


Abb. 7: Übersicht der vergleichenden Untersuchungen zur Charakterisierung verschiedener Schlämmensysteme und Präparation der Bohrkerne

Die untersuchten Bohrkerne wurden nach 2½ Jahren Standzeit aus der Testfläche an der Ostwand entnommen (Abbildung 8 und 9).

Abb. 8: Ansicht der Schlämmentestfläche an der Ostwand der ev. ref. Kirche in Eilsum nach 2½ Jahren Standzeit.

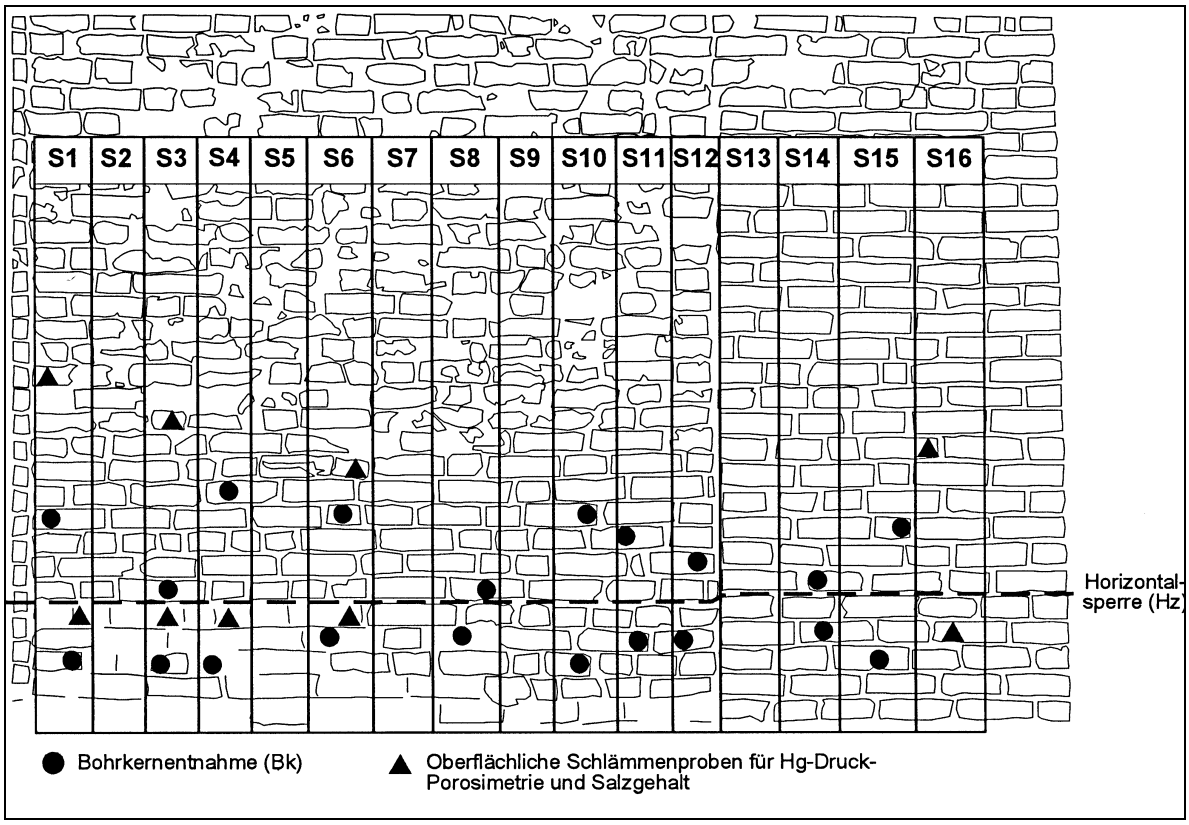


Abb. 9: Lage der Meßpunkte- und Probenentnahme innerhalb des kartierten Testfeldes (Ostwand).

Eine Betrachtung der Schlämmensysteme aus naturwissenschaftlich-denkmalpflegerischer Sicht beinhaltet neben der Charakterisierung der feuchtetechnischen/baustoffphysikalischen Wirkung der Schlämmen die optische Begutachtung und Übertragung auf den Gesamteindruck des durch die Beschichtung veränderten Bauwerkes. Durch die Beschichtung der Fassade mit einer Schlämme soll in erster Linie eine Reduzierung des Wassereintrages von Außen erzielt werden. Daher liegt ein Schwerpunkt der Untersuchungen im Vergleich der zeitlichen Entwicklung feuchtetechnischer Eigenschaften einzelner charakteristischer Schlämmen über den Verwitterungszeitraum von 2½ Jahren.

3.1.4.2 Salzanalyse

Die Kirche in Eilsum ist problematischen Standortbedingungen ausgesetzt. Auf einer kleinen Warft gelegen, reicht das ursprünglich 60 cm tiefe Fundament heute 1,20 m tief in den dort stark feuchten Marschboden. Aufsteigende Mauerfeuchte und der Einfluss von Aerosolen (Meeresnähe) hat Jahrhunderte lang zu einer kontinuierlichen Anreicherung von bauschädlichen Salzen in dem durchschnittlich 1,40 m dicken Mauerwerk geführt. Nachdem 1974 eine Horizontalsperre eingezogen wurde, konnte der Feuchtestrom größtenteils unterbunden werden. An Bohrkernen ermittelte Feuchtegehalte des Mauerwerks zeigen die posiriven Auswirkungen der Horizontalsperre heute deutlich. Unterhalb liegt die Feuchtigkeit bis um den Faktor 10 höher (70-85% der Sättigungsfeuchte) als oberhalb der Horizontalsperre.
Frühere Untersuchungen von SCHWARZ & RÖSCH (1993) sowie NEUMANN (1993) zur Salzverteilung (Nordfassade und Innenraum im Höhen- und Tiefenprofil) bestätigen diese Entwicklung. Eine Verteilung, die auf einen zumindest früheren starken Transport durch aufsteigende Mauerfeuchte schließen läßt, zeigt sich wie folgt:
Chloride und Nitrate als leichtlösliche Salze sind unterhalb der Horizontalsperre im oberflächennahen Ziegelbereich mit Konzentrationen bis 0,4 Gew.-% angereichert (ein weiteres Maximum mit 0,7- 0,8 Gew.-% liegt in 25 cm Mauertiefe), über der Horizontalsperre gehen die Gehalte plötzlich um den Faktor 10 zurück. Die Sulfatkonzentration unterliegt einer anderen Verteilung: Bis auf partielle Gipsanreicherungen unter Abplatzungen (in höheren Wandbereichen) ist in oberflächennahem Bereich kaum Sulfat nachzuweisen. In 14-20 cm Mauertiefe hingegen steigt der SO_4^{2-} - Gehalt sprunghaft an.

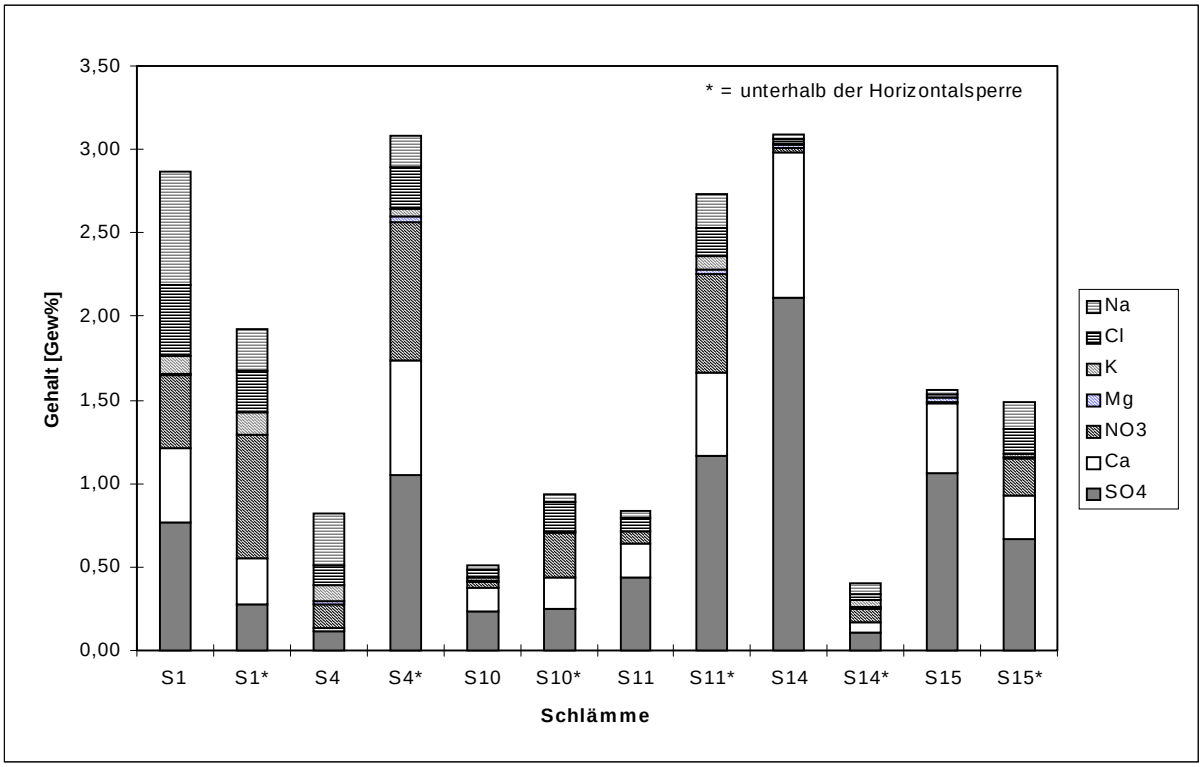


Abb. 10: Oberflächennahe Salzverteilung in Bohrkernproben

Auch hier gilt, daß unterhalb der Horizontalsperre höhere Konzentrationen vorliegen als oberhalb. Sie sinken von 1,3 Gew.-% auf 1,0 Gew.-% direkt über der Horizontalsperre und nehmen mit steigender Höhe bis auf 0,01 Gew.-% ab. Drei Jahre später sind bei Bohrkernuntersuchungen (Ostwand) allgemein ähnliche Verhältnisse in der Verteilung unterhalb und oberhalb der Horizontalsperre festzustellen. In Abbildung 10 ist eine starke Anreicherung von Gips im oberflächennahen Bereich (bis 1,5 cm unter der Oberfläche) unter S14 und S15 zu erkennen. Der Anteil löslicher Salze ist dort relativ gering. Die Untersuchung der hygrischen Feuchteaufnahme zeigt dementsprechend einen deutlichen Anstieg in der Feuchteaufnahme der Bohrkernscheiben des ersten Zentimeters (siehe Anhang).

Die gezielte Salzuntersuchung an einigen ausgewählten körperhaften Schlämmenproben (S1, S2, S5, S6 und S16) zeigt, daß die Systeme S1-S6 innerhalb von zweieinhalb Jahren beachtliche Mengen an Salz (bis zu 6 Gew.-%, unterhalb der Horizontalsperre) aufgenommen haben (siehe unter 3.1.4.8).

3.1.4.3 Optische Erscheinung/Mikroskopie der Oberfläche

Makroskopisch waren an den einzelnen Schlämmensysteme bereits kurze Zeit nach Fertigstellung der Testflächen erhebliche Unterschiede sichtbar. Die körperhaften Schlämmen S1 bis S6 wiesen leicht scheckige Oberflächen mit helleren und dunkleren Partien auf. Die Systeme S7 bis S12 zeigten deutlich größere Inhomogenitäten in Form von leichten bis sehr starken Aufhellungen der Oberflächen. Von den Industrieprodukten waren Schlämme S13 teilweise scheckig, S16 zeichnete sich früh durch starkes Absanden aus, an einigen Stellen liegen die Ziegeloberflächen wieder frei. S14 und S15 waren vergleichsweise homogen, fielen aber durch kräftige und gewöhnungsbedürftige Farben auf.
Nach 2½ Jahren Standzeit war der optische Zustand der Schlämmenflächen teilweise wieder etwas ausgeglichener. In Tabelle 2 sind die optischen Merkmale nach dieser Zeit zusammengefasst.

Tabelle 2: Zustand der Schlämmenflächen (Ostwand) nach 2½ Jahren Standzeit

Schlämme	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
Farbver-änd.-Weißschlei-er							+		+		+			+	+	
Kreiden	+ +	+ +	+ +		+ +								++ ++			
Absanden	(+) (+)	(+) (+)	+ +	(+) (+)		(+) (+)										++ ++
Abblättern												+[4]	+[4]			
Ausblühun-gen		+			+		+									
Abplatzungen	(+)	+	(+)	(+)	+	(+)		+[1]	+[2]	+[1]	+[2]	+[1]		+[3] +[3]	+[1]	
Verschmut-zung	++	++	++	(+) ++	(+) ++	(+) ++	++	++	++	++	++	++	++	+	+	++

[1] auf weich gebrannten historischen Ziegeln
[2] bis auf die weiße Grundierung
[3] Glimmer (aus 2. Schicht) wittern die Wand herab zunehmend aus und sind unter der Hz. bereits völlig verschwunden
[4] im Fugenbereich

(+)	= schwach
+	= mittel
++	= stark

Hz. = Horizontalsperre

oberhalb d. Hz	+
unterhalb der Hz.	+

An den Oberflächen der Schlämmen S1 bis S6 war nach 8 Monaten Standzeit stellenweise die Ablösung einer dünnen Carbonathaut zu beobachten. Die teilweise intensiven Aufhellungen bis weißlichen Verfärbungen der Probenoberflächen der Systeme S7 bis S12 wurden durch Calcitkristallisation auf der pigmentierten Schicht hervorgerufen und sind nach 2½ Jahren Standzeit nur noch bei S7, S9 und S11 zu beobachten. Es handelt sich hierbei nicht nur primär um Ausblühungen, sondern ist auch eine Folge der Oberflächenbehandlung mit $Ca(OH)_2$-Lösung. Die starke Neigung zum Absanden der Schlämme 16 liegt neben der Zuschlaggröße im geringen Bindemittelanteil sowie dem hohen Luftporengehalt begründet. Bei den Industrieschlämmen S14 (Dispersions-Silikat-System) und S15 (Siliconharzemulsion) wurden nach 2½ Jahren starke Abplatzungen im oberen Grenzbereich geschlämmter und ungeschlämmter Ziegel beobachtet (Abbildung 11 und 12).

Die optische Untersuchung der Schlämmengrenzschichten an Dünnschliffen der Testplättchen und von Proben der Testfläche Ost-Wand (mit ihren bauwerksrelevanten Untergründen) verdeutlicht, daß die Schlämmen S 1 bis S 6 eine überwiegend gute Haftung am Ziegel zeigen. Bei den “Anstrichsystemen” S8, S9 und S11 führen Abrisse innerhalb der Grundierung, zwischen den pigmentierten Schichten sowie ein hoher Luftporengehalt in den Schichten zu deutlichen Haftungsproblemen. Unter den Industrieprodukten wurde teilweise eine unzureichende Haftung am Untergrund festgestellt, wobei Schlämme S14 auch Bereiche mit sehr guter Haftung aufweist. Auffallend ist bei S15 die intensive Verzahnung mit der Ziegeloberfläche, selbst auf vergipsten Oberflächenpartien (BLÖCHL et al. 1996).

Abb. 11: S14 oberhalb der Horizontalsperre: Abplatzungen mit Ziegelverlust im Übergangsbereich der Schlämme 14 und ungeschlämmter Ziegel nach 2½ Jahren Standzeit

Abb. 12: S15 oberhalb der Horizontalsperre: Abplatzungen mit Ziegelverlust im Übergangsbereich der Schlämme 15 und ungeschlämmter Ziegel nach 2½ Jahren Standzeit

Die auflichtmikroskopische Betrachtung der geschlämmten Bohrkernoberflächen zeigt charakteristische Oberflächenmerkmale der einzelnen Schlämmengruppen.
Die rein *mineralischen körperhaften Systeme* S1 und S3 zeichnen sich nach 2½ Jahren durch ein leichtes Abwittern der Beschichtung auf den gröberen Zuschlägen aus. Dadurch sichtbar werdende Quarzkörner sind bis auf wenige Ausnahmen noch fest in der Bindemittelmatrix verankert (Abbildung 13). Die Zugabe von Leinöl bei den Systemen S4 und S6 bewirkt scheinbar eine bessere Haftung des Bindemittels an den Quarzoberflächen. Die Zuschläge sind von dem Bindemittel vollständig umschlossen. Vereinzelt herausgebrochene Zuschläge verursachen einen geringen Anteil von Fehlstellen in der Beschichtung (Abbildung 14). Unterhalb der Horizontalsperre lassen sich bei den körperhaften Systemen unter allgemein starker Verschmutzung dichte Sinterkrusten erkennen (Abbildung 15). Fehlstellen sind deutlich häufiger vorhanden und teilweise mit einem dichten Salzrasen gefüllt (Abbildung 16).
Die feinkörnige Oberflächenstruktur der *Systeme mit Anstrichcharakter* weicht stark von den körperhaften Systemen ab. Die relativ homogenen Oberflächen der Schlämmen S8, S11 und S12 sind bei der auflichtmikroskopischen Untersuchung in Ordnung (Abbildung 17). Die obere Schicht von S8 und S11 ist aufgrund der nachträglichen Berieselung mit Kalksinterwasser sichtbar versintert. Unterhalb der Horizontalsperre neigen auch diese Beschichtungen zu Verschmutzungen, die jedoch deutlich geringer ausfallen als bei den körperhaften Systemen. Schlämme S11 platzt unabhängig von der Exposition schollenartig über der weißen Zwischenschicht auf (Abbildung 18). Vermutlich führt der dreifache Endanstrich zu Spannungen an der Kontaktfläche zur Zwischenfassung. Das mit organischen Zusätzen versehene System S10 fällt durch eine porenreiche Oberfläche auf, die teilweise den Blick auf die extrem grobporige Zwischenschicht freigibt (Abbildung 19).
Das *Industriesystem* S14 weist eine ebene Oberfläche auf. Oberhalb der Horizontalsperre ist das Bindemittel über sich in der Beschichtung befindlichen Glimmern zurückgewittert, während unterhalb der Horizontalsperre die Glimmer bereits fast vollständig ausgewittert sind und sich nur noch die Negativabdrücke erkennen lassen (Abbildung 20 und 21). Industriesystem S15 ähnelt in der grobkörnigeren Struktur den körperhaften Schlämmensystemen. Die Oberfläche ist bei der auflichtmikroskopischen Beurteilung bis auf wenige dünne Abschalungen vor allem auch unterhalb der Horizontalsperre intakt (Abbildung 22).

Abb. 13: S1 oberhalb der Horizontalsperre: Hier zeigt S1 ein leichtes Abwittern der Oberfläche. (50-fache Vergrößerung)

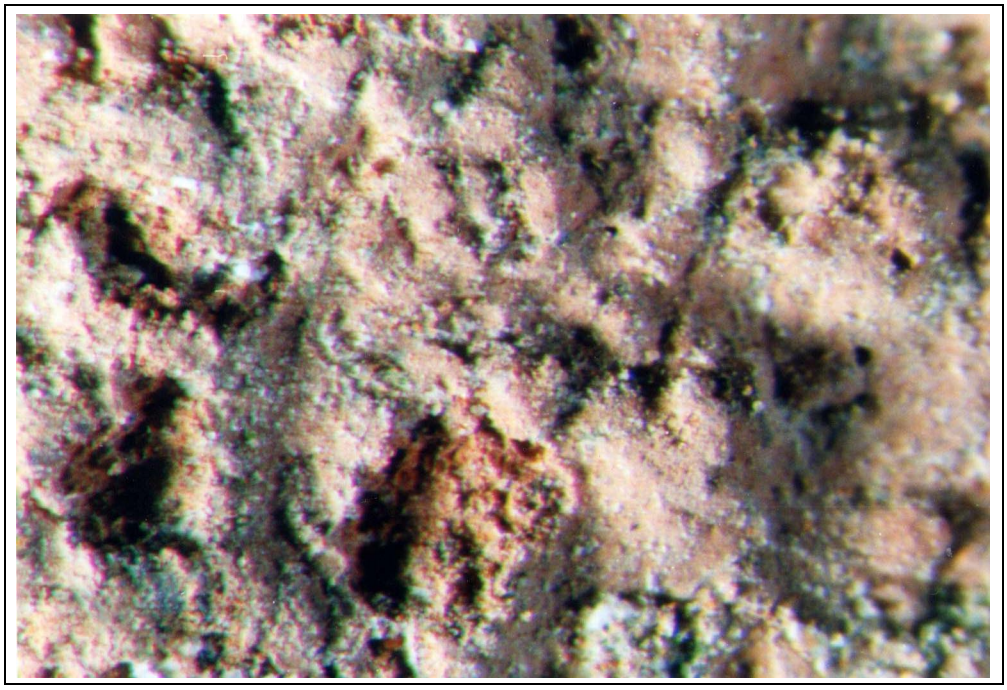


Abb. 14: S4 oberhalb der Horizontalsperre: Bei S4 sind vereinzelt herausgebrochene Zuschläge zu erkennen (50-fache Vergrößerung).

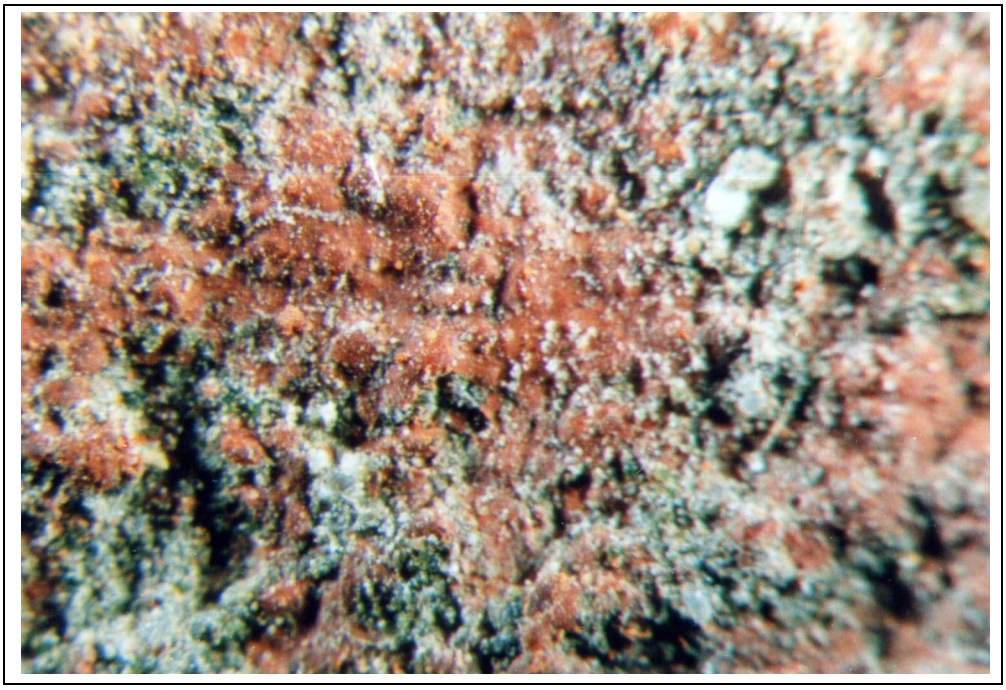


Abb. 15: S4 unterhalb der Horizontalsperre: S4 weist wie auch die anderen körperhaften Schlämmen unter der Horizontalsperre neben einer biogenen Besiedelung dichte Sinterkrusten auf (20-fache Vergrößerung).

Abb. 16: S4 unterhalb der Horizontalsperre: In aufgebrochenen Fehlstellen sind bei den körperhaften Schlämmen unter der Horizontalsperre Salzanreicherungen zu erkennen (hier S4; 50-fache Vergrößerung).

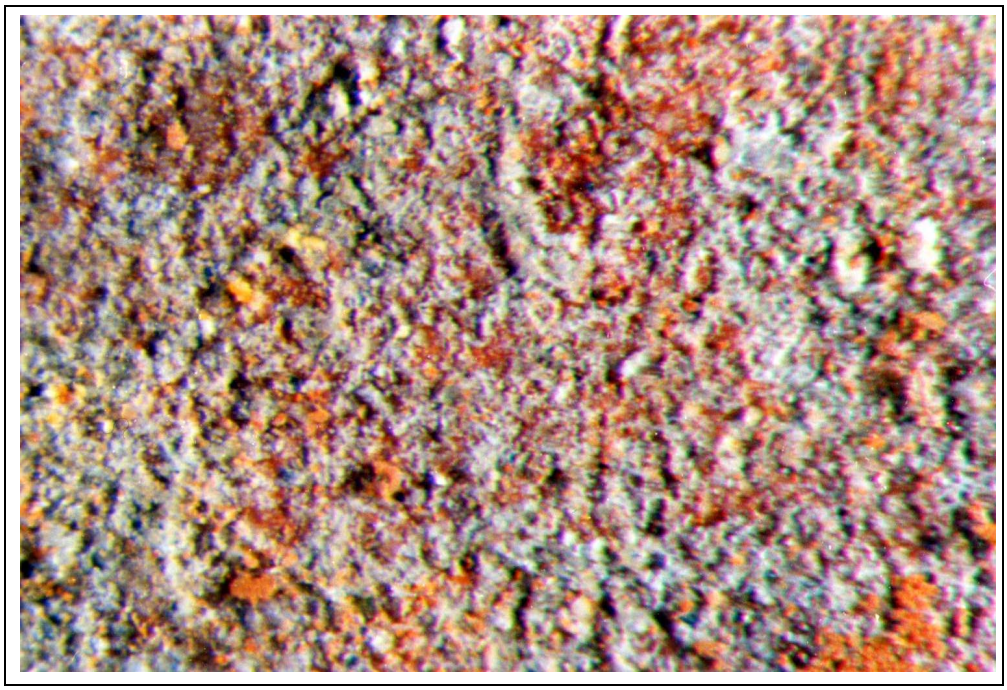


Abb. 17: S8 unterhalb der Horizontalsperre: S8 ist auch unter der Horizontalsperre noch weitgehend intakt (50-fache Vergrößerung).

Abb. 18: S11 oberhalb der Horizontalsperre: Bei S11 platzt die obere Schicht über der weißen Zwischenschicht schollenartig auf (20-fache Vergrößerung).

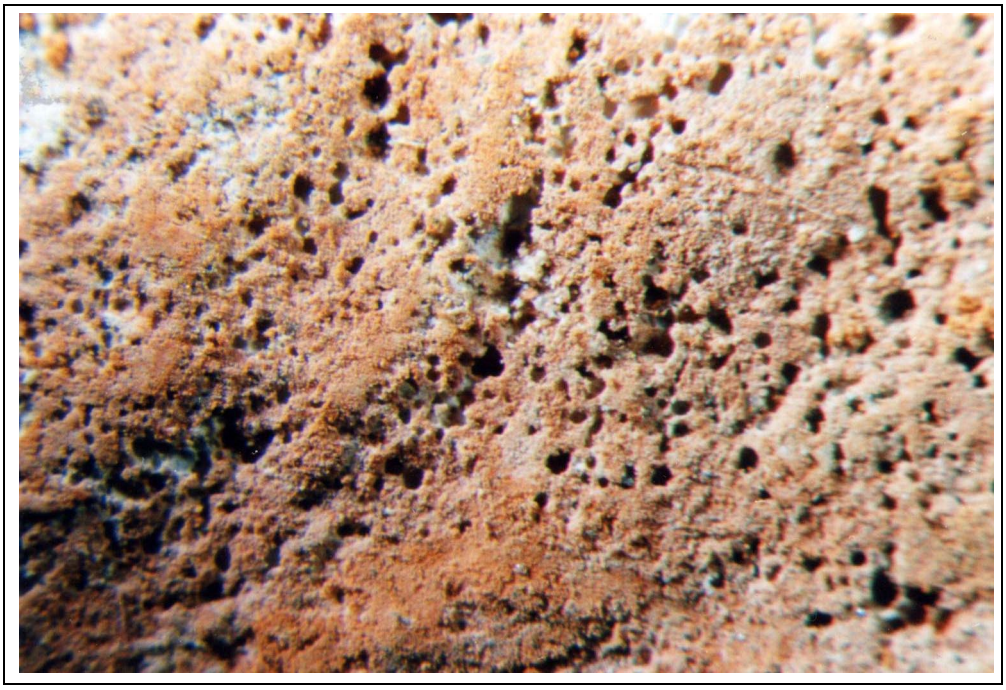


Abb. 19: S10 oberhalb der Horizontalsperre: S10 fällt durch die stark poröse obere Schicht auf, durch die sich die weiße Zwischenschicht erkennen läßt (20-fache Vergrößerung).

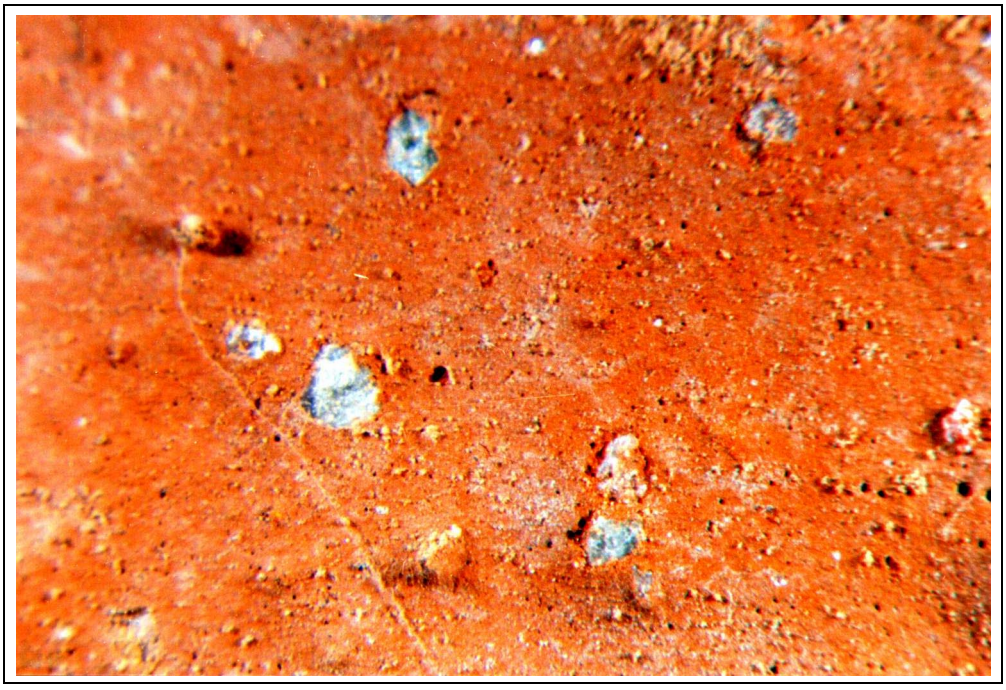


Abb. 20: S14 oberhalb der Horizontalsperre: Bei bei S 14 wittert die Oberfläche über den in der Zwischenschicht befindlichen Glimmern ab (20-fache Vergrößerung).

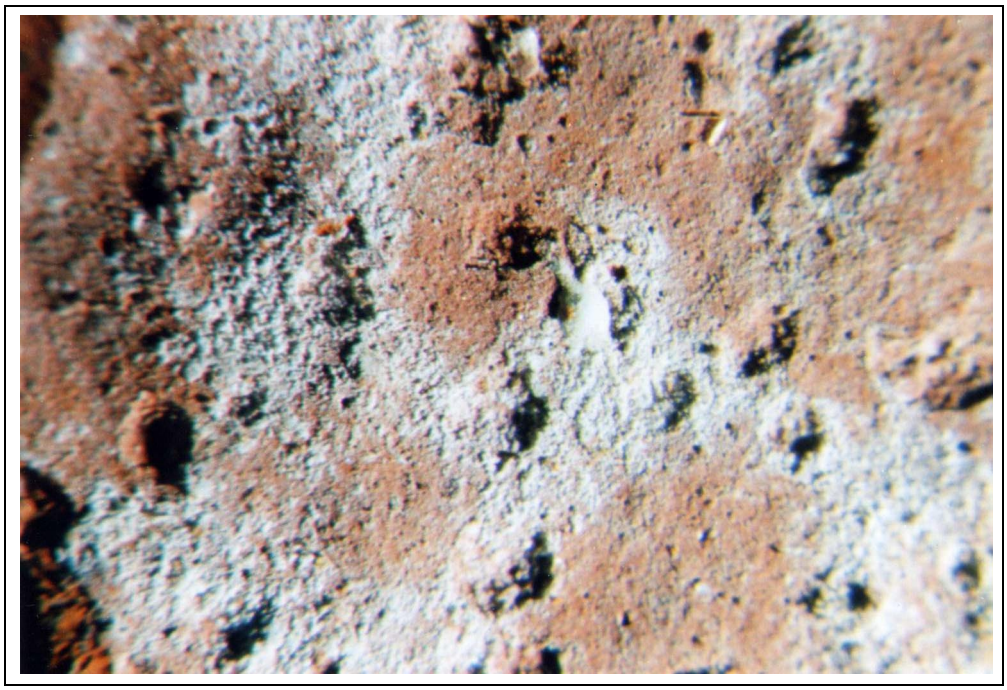


Abb. 21: S14 unterhalb der Horizontalsperre: Hier sind die Glimmer bereits herausgewittert (20-fache Vergrößerung).

Abb. 22: S15 unterhalb der Horizontalsperre: S15 zeigt auch hier ein intaktes Erscheinungsbild (20-fache Vergrößerung).

3.1.4.4 Kapillare Wasseraufnahme

In Ermangelung eines der DIN 52 617 genügenden Prüfkörpers wurde an den 5x5x0,5 cm großen Testplättchen ein einfaches Verfahren zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme angewandt. Die Probeplättchen wurden mit der Schlämmenfläche nach unten auf wassergesättigten Schaumstoff gelegt und die Zeit, die zur vollständigen Durchfeuchtung der Ziegelrückseite benötigt wurde, wurde protokolliert. Die Zeitspannen liefern bereits gute Aussagen über die kapillare Wasseraufnahmefähigkeit, da die Dicke und die Fläche aller Substrate identisch sind. Nach SATTLER et. al. 1989 wurden in Kenntnis des w-Wertes des Untergrundes näherungsweise die w-Werte der Beschichtungen berechnet. In Abbildung 23 ist eine deutliche Gliederung der frischen Systeme zu erkennen. Die Schlämmen S1-S6 und S13 zeigen ein kapillar offenes Saugverhalten. Die Schlämmen S7-S12 wirken hingegen wasserhemmend, S14 und S15 sind nahezu wasserundurchlässig.

Der Vergleich der frischen Laborpräparate mit den mittleren w-Werten der Schlämmen nach 2½ Jahren Standzeit oberhalb der Horizontalsperre an Bohrkernen (Abbildung 24) verdeutlicht, inwieweit die Schlämmen einer Veränderung durch Verwitterung ausgesetzt sind. Die seitlich abgedichteten Bohrkerne wurden unter bis zur Gewichtskonstanz vorkonditioniert, um der Realsituation vor Ort eher zu entsprechen, als es nach einer 105 °C-Trocknung der Fall wäre. Da die Bohrkerne aus unterschiedlichem in der Fassade verbauten Ziegelmaterial entnommen waren, wurd nicht nur der Wasseraufnahmekoeffizient über die Beschichtung nach DIN 52 617 bestimmt, sondern als Vergleichswert ebenfalls der w-Wert der rückseitigen (offenen) Ziegelfläche.

Im Vergleich von Abbildung 23 und 24 wird deutlich, daß die körperhaften Schlämmen S1-S6 einen niedrigeren Wasseraufnahmekoeffizient aufweisen als in frischem Zustand. Dies läßt sich teilweise auf die Reduktion des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten unter dem Einfluss von Salzen zurückführen (GARRECHT 1992). Die Systeme mit Anstrichcharakter verlieren im Laufe der Zeit ihre wasserabweisenden Eigenschaften und bieten nach 2½ Jahren keinen Schutz mehr vor eindringender Feuchtigkeit. S13 ist nach wie vor sehr wasserdurchlässig. S14 und vor allem S15 zeigen den höchsten Feuchteschutz von allen getesteten Systemen, sowohl in frischem Zustand als auch noch nach 2½ Jahren.

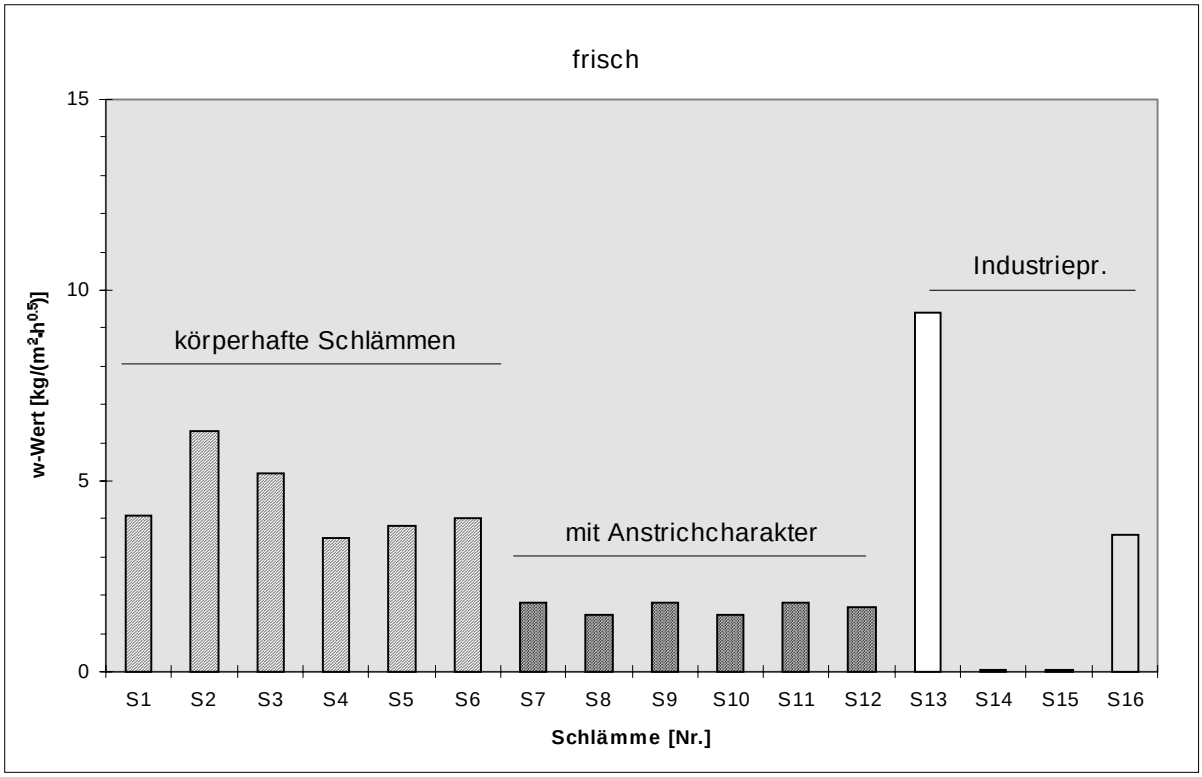


Abb. 23: Kapillare Wasseraufnahme der unbelasteten Systeme an Laborproben

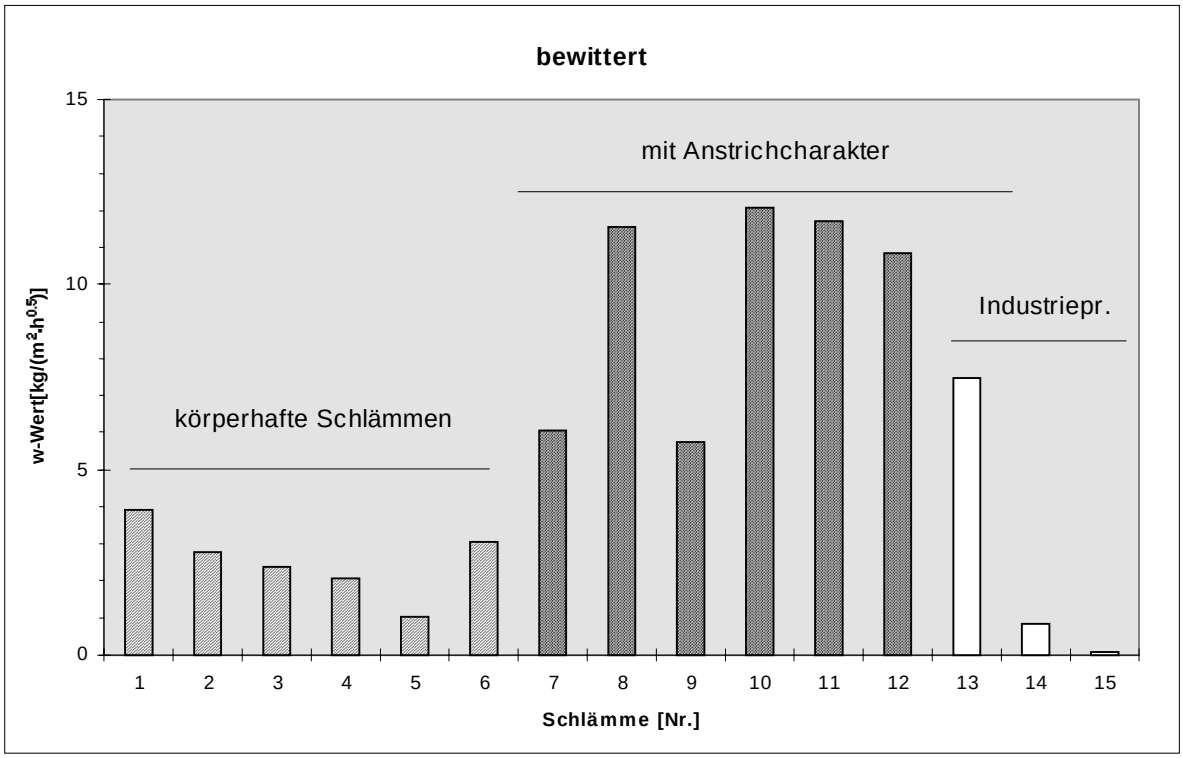


Abb. 24: Mittlere kapillare Wasseraufnahme der Schlämmen nach 2½ Jahren Bewitterung. Die Prüfung von S16 war aufgrund starken Absandens nicht möglich.

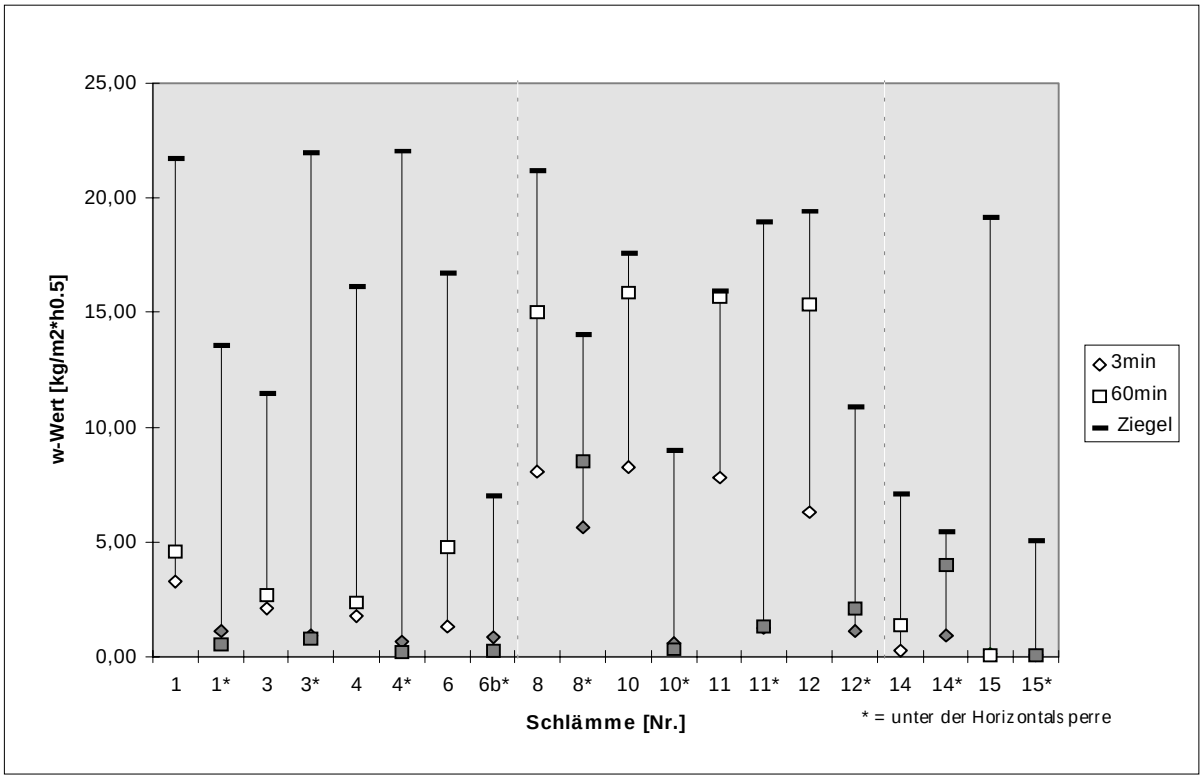


Abb. 25: Zeitabhängige Entwicklung der w-Werte der Schlämmen (an Bohrkernen nach 2½ Jahren Bewitterungsdauer) während eines Saugvorganges.

Unter Berücksichtigung der Exposition und der Veränderung des w-Wertes in Abhängigkeit von der Saugdauer läßt sich aus Abbildung 25 nach 2½ Jahren Bewitterungsdauer folgendes entnehmen:

Unterhalb der Horizontalsperre sind die w-Werte generell (bis auf S8) sehr niedrig und verändern sich kaum innerhalb von 60 min.

Oberhalb der Horizontalsperre ist bei den körperhaften Schlämmen S1-S6 ein rel. konstant bleibender w-Wert unter 5 kg/(m²·√h), zu erkennen. Bei den dünn aufgetragenen Systemen (S7-S12) steigt der bereits hohe w-Wert noch innerhalb des Saugvorgangs. Die Industriesysteme S14 und S15 zeichnen sich durch eine sehr geringe kapillare Wasseraufnahme aus.

Aus den Spannweiten des w-Wertes von 3 bis 60 min läßt sich der Einfluss des Untergrundes auf die Wasseraufnahme der Schlämme ablesen:

Bei den Systemen S1-S6 ist genug Körper vorhanden, um eine *untergrundunabhängige* Reduzierung der Wasseraufnahme zu gewährleisten. Dies äußert sich in einem nahezu gleichbleibenden w-Wert. Die Systeme S7-S12 zeigen von vornherein einen hohen Wasseraufnahmekoeffizienten. Der stark saugende Ziegeluntergrund gewinnt mit zunehmender Saugdauer an Einfluss (vergl. dazu

S10 und S11 oberhalb der Hz.). Die Schlämmen S14 und S15 bewirken eine genügend starke Wasserabweisung; die kapillaren Eigenschaften des Ziegels zeigen keine Auswirkungen auf den w-Wert.

Um Veränderungen der Schlämmensysteme über den Bewitterungszeitraum von 2½ Jahren festzustellen, wurde in regelmäßigen Abständen die kapillare Wasseraufnahme mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen nach WENDLER & SNETHLAGE 1989 ermittelt. KNÖFEL et al. 1995 beschreiben bei Messungen mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen über Fugen Probleme, die eine Reproduzierbarkeit schwierig machen. Sicherlich läßt sich anhand der Prüfmethode nach PLEYERS 1999 b. eine höhere Genauigkeit erzielen (ein weiter entwickeltes, auf dem Karsten-Röhrchen basierendes Prüfgerät). Dies Verfahren konnte in dieser Arbeit noch nicht getestet werden. In den Untersuchungen dieser Arbeit muss jedoch ein besonderer Punkt berücksichtigt werden: Da es sich hier um Prüfflächen (Untergründe) handelt, welche stark durch Salze belastet sind (Kap. 3.1.4.2), die je nach Luftfeuchtigkeit unterschiedliche Hydratstufen (Sorptionsisothermen im Anhang) einnehmen können, wird die kapillare Wasseraufnahme im Gegensatz zu unbelasteten Proben stärker von Schwankungen der rel. Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Ein Vergleich der direkt vor der Bohrkernentnahme gewonnenen Daten mit den im Labor ermittelten w-Werten verdeutlicht diese Abhängigkeit (Abbildung 26).

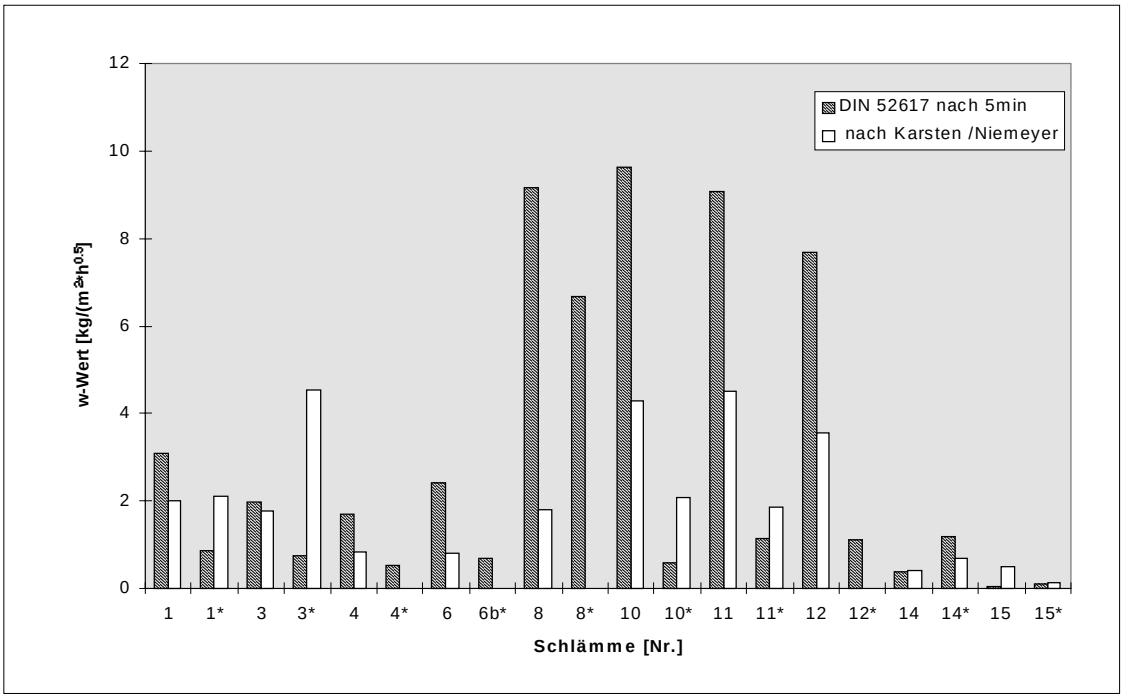


Abb. 26: Vergleich der w-Werte identischer Flächen vor der Bohrkernentn. anh. d. Karsten'schen Prüfrohrs (KARSTEN 1983 und NIEMEYER 2000) sowie im Labor (nach DIN 52 617).

In der Regel liegen die w-Werte der Karstenmessungen aufgrund der dreidimensionalen Ausbreitung des eindringenden Wassers höher, als die im Labor über kapillares Saugen zweidimensional ermittelten Werte (nach PLEYERS 1999 b. kann die zweidimensionale Ausbreitung des Wassers berechnet werden).
Die Messungen mit dem Karsten'schen Prüfröhren wurden an einem Herbsttag (ca. 90% rel. Lufteuchtigkeit) vorgenommen; selbst nach der Lagerung bei 50% rel. Lufteuchtigkeit zeigen die Bohrkerne höhere Wasseraufnahmekoeffizienten als die identischen Punkte bei der Karstenmessung. Dabei fällt besonders die Differenz in den Werten von S8 bis S12 auf, die auf den stärker werdenden Untergrundeinfluss zurückzuführen ist. Je höher die relative Luftfeuchtigkeit, desto geringer ist das kapillare Saugen, desto weniger fällt der Untergrundeinfluss ins Gewicht. Bei Anwendung der von NIEMEYER 2000 modifizierten Berechnungsmethode nach WENDLER & SNETHLAGE 1998 werden die Werte der Karstenmessungen noch kleiner (siehe unter Kapitel 2, Untersuchungsmethoden).
Die Untersuchungen verdeutlichen, daß die Prüfung mit dem Karsten'schen Prüfrohr auf salzbelasteten Untergründen bestenfalls zu groben Aussagen über kapillare Saugeigenschaften herangezogen werden kann. Daher muß an dieser Stelle auf Aussagen zu zeitlichen Veränderungen der Schlämmen, die sich in kleinen w-Werträumen abspielen, verzichtet werden.

3.1.4.5 Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Probeplättchen (5 cm x 5 cm x 0,5 cm) wurden nach der Wet-Cup-Methode entsprechend WTA Merkblatt 2-3-92 ohne inertes Trägermaterial, in Anlehnung an DIN 52 615 auf die schlämmenspezifische Wasserdampfdiffusion überprüft. Der Wasserdampfdiffusionsstrom wurde im Normklima DIN 50014-23/50-2 gemessen.
In unbewittertem Zustand genügen die Schlämmen den bauphysikalischen Ansprüchen und liegen in einem unbedenklichen Bereich. Laut der vorgeschlagenen Klassifikation nach DIN EN 1062 Teil 3 werden Systeme mit einem S_d-Wert >1,4 als gering -, mit einem S_d-Wert von 0,14 - 1,4 als mittel- und einem S_d-Wert < 0,14 als hoch wasserdampfdurchlässig beschrieben. Danach sind alle auf Kalk basierenden Systeme (S1-S13, S16) und das Dispersions-Silikatsystem (S14) als hoch wasserdampfdurchlässig zu bezeichnen; das Siloxan-Emulsionssystem (S15) ist als mittel wasserdampfdurchlässig zu bewerten.

Tabelle 3: S_d-Werte der Schlämmen im Verbund Beschichtung / Ziegel:

Von Restauratoren entwickelte Systeme

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	
0,08	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05	[1]
9,00		8,40	14,00		11,1		13,60		13,60	19,00	[2a]
11,70		16,0	23,10		43,8		10,80		51,60	27,20	[2b]

Industriesysteme

S12	S13	S14	S15	S16	
0,06	0,05	0,05	0,33	0,05	[1]
28,00		19,80	11,70		[2a]
12,60		9,70	7,10		[2b]

[1] s_d-Wert der unbewitterten Schlämme auf den Testplättchen (nur Schlämme / Ziegel)
[2] s_d-Wert der bewitterten und salzbelasteten Oberflächenscheiben (1cm) der beschlämmten Bohrkerne nach 2½ Jahren Standzeit (Verbund Schlämme / Ziegel); ***a:*** oberhalb der Hz; ***b***: unterhalb der Hz.

Da der Wasserdampf-Diffusionswiderstand durch die physikalischen Eigenschaften des Trägers beeinflusst wird (BAGDA, 1981), ist neben der grob vergleichenden Darstellung die detaillierte Beschreibung des s_d-Wertes der bewitterten Schlämmen infolge des inhomogenen (salzbelasteten) Untergrunds nicht sinnvoll. KÜNZEL 1991 stellt in seinen Versuchen zum Wasserdampf-Diffusionsverhalten salzbefrachteter Baustoffe eine Erhöhung des µ-Wertes eines unbelasteten Kalkzementputzes von 11 auf 290 nach einer NaCl-Beaufschlagung fest. Die Gegenüberstellung der Werte des oberen ersten Zentimeters der beschlämmten Bohrkerne in Tabelle 3 zeigt, daß die Wasserdampfdiffusion durch die Beschichtungen unter der Horizontalsperre aufgrund der höheren Salzgehalte tendenziell stärker gehemmt ist als über der Horizontalsperre, wobei die Werte mindestens um Faktor 1,2 und im Vergleich zu den unbelasteten Testplättchen mindestens um Faktor 100 höher liegen. Bei S14 und S15 oberhalb der Horizontalsperre befindet sich im Bohrkern ein dichter Gipshorizont unter der Schlämme. Dieser Gipshorizont scheint die Ursache für eine stärkere Behinderung der Wasserdampfdiffusion zu sein.

3.1.4.6 Trocknungsverhalten

Nicht nur die Reduzierung der Wasseraufnahme bei der Beschichtung eines feuchte- und salzbelasteten Mauerwerks spielt eine Rolle, sondern auch die dadurch erlangten Trocknungseigenschaften charakterisieren die Funktion eines Fassadenschutzes. Zur Prüfung des Trocknungsverhaltens wurden die seitlich abgedichteten beschlämmten Bohrkerne nach rückseitiger Wasseraufnahme (bis zur Sättigung) zusätzlich von unten abgedichtet und bei Normklima 30 Tage durch die Beschichtung getrocknet. In diesen Versuchen wurde die Trocknungsgeschwindigkeit bei Erreichen von 75% (vt75% in [kg/(m2·h)]) des Gesamtwassergehaltes als Vergleichsmaß für das Trocknungsverhalten der Schlämmen herangezogen. Die Untersuchungen zeigen, daß bei diesen Feuchtigkeitsgehalten allgemein die Abgabe von Oberflächenwasser weitgehend abgeschlossen ist und bei kapillar aktiven Systemen die Phase noch nicht begonnen hat, in der die Trocknung nur über die Diffusion verläuft. Weiterhin ist davon auszugehen, daß 75% Feuchtegehalt ungefähr der mittleren Belastung unterhalb der Hz., bzw. den größten zu erwartenden Feuchtebelastungen der Schlämmen aus dem Mauerinneren heraus entspricht. Dies bedeutet, daß anhand der gewählten Vergleichsmaße die realen Verhältnisse am Bauwerk mit berücksichtigt werden.
Abbildung 27 zeigt exemplarisch das Trocknungsverhalten der unterschiedlich trocknenden Schlämmensysteme (weitere Abbildungen im Anhang), jeweils oberhalb (gefüllte Symbole) und unterhalb (ungefüllte Symbole) der Horizontalsperre.

In der linken Reihe sind von oben nach unten folgende Systeme dargestellt:
I. körperhaft/rein mineralisch, II. körperhaft/mit organischen Zusätzen, III. Dispersions-Silikatsystem.

Die rechte Reihe zeigt von oben nach unten folgende Systeme:
I. mehrschichtiger Anstrich/rein mineralisch, II. mehrschichtiger Anstrich/mit organischen Zusätzen, III. gefüllte Siliconharzemulsion.

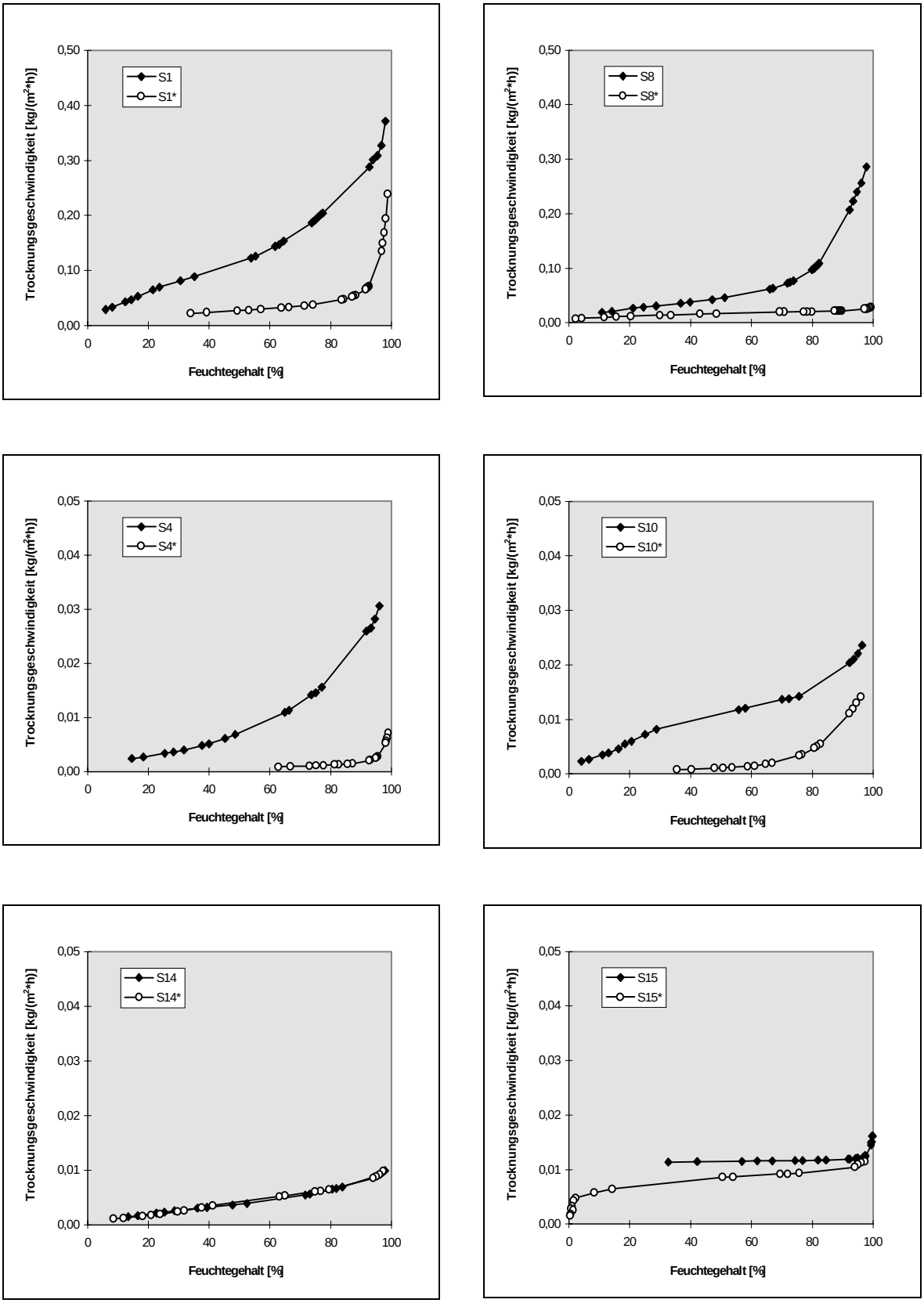


Abb. 27: Vergleich der Trocknungseigenschaften verschiedener Schlämmensysteme. Rechts und links von oben nach unten: I. schnell trocknende Restauratorensysteme mit rein mineralischen Zusätzen *(10-fach größerer Maßstab!)*, II. deutlich langsam trocknendere Restauratorensysteme mit organischen Zusätzen und III. Industriesysteme mit organischen Bestandteilen.

Bei S1 und S8 nimmt die kapillar unterstützte Trocknung einen wesentlichen Teil ein. Daraus resultiert eine deutlich höhere Trocknungsgeschwindigkeit (Faktor 10, abweichender Maßstab der Ordinate) als bei entsprechenden Systemen mit organischen Zusätzen S4 und S10, deren kapillarer Trocknungsanteil dadurch verringert wird. Durch den vergrößernden Maßstab läßt sich in Abbildung 27 bei S10 deutlich der Übergang von kapillar und diffusiv gekoppelter Trocknung in den rein durch Diffusion bestimmten Trocknungsabschnitt erkennen (Änderung des Kurvenverlaufs). S14 und S15 sind Beschichtungen, über die die Trocknung ausschließlich durch Diffusion erfolgen kann. Im Vergleich zu den anderen Systemen ist die Trocknungsgeschwindigkeit durchgehend niedrig.
In Tabelle 4 sind die Trocknungsgeschwindigkeiten ($v_{t75\%}$ in [kg/(m^2 · h)]) der Bohrkerne *zur übersichtlicheren Darstellung mit dem Faktor 100 versehen*:

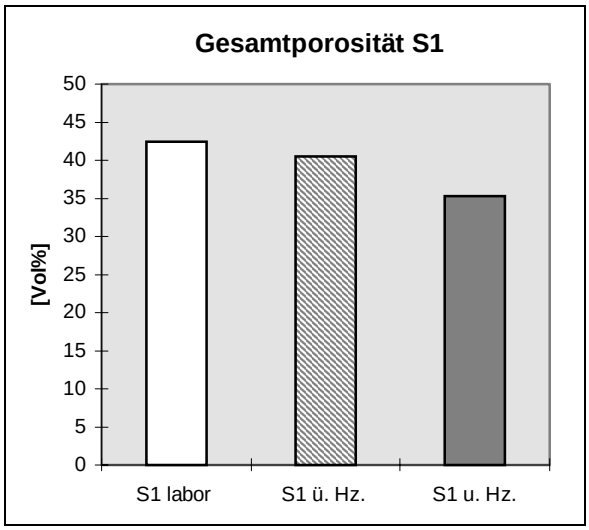
Tabelle 4: Trocknungsgeschwindigkeiten ($v_{t75\%}$ [kg/(m^2 · h)] · 100) der beschlämmten Bohrkerne in Abhängigkeit von der Exposition

$v_{t75\%}$	**S1**	**S3**	**S4**	**S6**	**S8**	**S10**	**S11**	**S12**	**S14**	**S15**
oberhalb der Hz.	19,2	27,1	1,5	3,4	8,7	1,4	3,8	0,2	0,6	1,2
unterhalb der Hz	3,7	7,5	0,1	3,9	2,0	0,3	2,3	1,5	0,6	0,9

Trotz des inhomogenen Untergrundes lassen sich den verschiedenen Schlämmengruppen charakteristische Trocknungseigenschaften zuordnen:
Über der Horizontalsperre ist die Trocknungsgeschwindigkeit der kapillar offenen, rein mineralischen Systeme hoch bis sehr hoch (S1, S3 und S8). Die von Restauratoren entwickelten Schlämmensysteme mit organischen Zusätzen zeigen ca. um den Faktor 10 geringere Trocknungsgeschwindigkeiten. Am stärksten behindert wird die Trocknung bei den Industriesystemen S14 und S15. Im Fall von S12 liegt eine Trocknungsblockade aufgrund großer Salzgehalte vor (hohe hygroskopische Feuchte bei 50% rel. Luftfeuchtigkeit; bei der Prüfung des s_d-Wertes erscheint die Probe naß).
Unter der Horizontalsperre trocknen die Bohrkerne innerhalb des jeweiligen Systems in der Regel langsamer (bis auf S12, S6), wobei die Trocknungsgeschwindigkeit mit sinkenden Wassergehalten noch schneller abnimmt als über der Horizontalsperre (steilerer Kurvenverlauf, vergl. Abbildung 27, I. links). Dies Verhalten ist auf wechselnde, bis zu 10-fach höhere Salzgehalte, besonders in oberflächennahen Bereichen der Bohrkerne zurückzuführen (siehe Anhang). Da unterhalb den Beschichtungen S4 und S10 wesentlich höhere Salzgehalte vorliegen als bei S14 und S15, wird bei diesen Systemen die Trocknung noch stärker behindert.

3.1.4.7 Porenraumentwicklung

Die Bestimmung des Porenraums der Schlämme S1, S3, S5 und S6 sollten beispielhaft expositionsbedingte Unterschiede klären, die durch feuchtetechnische Untersuchungen nachgewiesen wurden.
Das nach 2½ Jahren an der Ostwand entnommene Schlämmenmaterial (Abbildung 9) wurde grob zerkleinert, 72 Stunden bei 40 °C getrocknet und in der Fraktion 2-4 mm mit Hilfe der Hg-Druckporosimetrie auf die Porenverteilung geprüft. In Abbildung 29 ist eine deutliche Entwicklung der Porenvolumina in Abhängigkeit von der Entnahmestelle zu erkennen. Je trockener die Carbonatisierungsbedingungen der Schlämmen, desto höhere Porenanteile konnten nachgewiesen werden. Unterhalb der Horizontalsperre, wo Materialfeuchten bis 90% des Sättigungsgrades auftreten, liegt die Schlämme mit einem deutlich geringeren Gesamtporenvolumen vor, als in dem ca. 10-fach trockeneren Bereich oberhalb der Horizontalsperre. Die größten Porenanteile weisen die Proben auf, die unter Laborklima bei 30% bis max. 50% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert wurden.
Die Systeme mit organischen Zusätzen (S4 und S6) weisen etwas höhere Gesamtporositäten auf als die entsprechenden rein mineralischen Systeme (S1 und S3; s. Anhang).
Im Vergleich der Porenfraktionen (Abbildung 29 und 31) zueinander wird deutlich, daß nicht nur die Porenvolumina der körperhaften Schlämmen unterhalb der Horizontalsperre geringer sind, sondern bei beiden Systemen (rein mineralisch und mit organischen Zusätzen) in erster Linie die Kapillarporenanteile zurückgehen. Je niedriger die jeweilige Untergrundfeuchtigkeit während des Carbonatisierungsvorganges ist, desto höhere Kapillarporenanteile sind nachzuweisen.



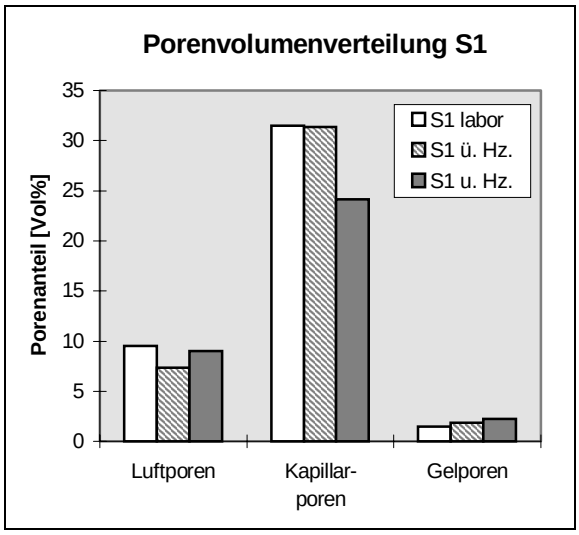
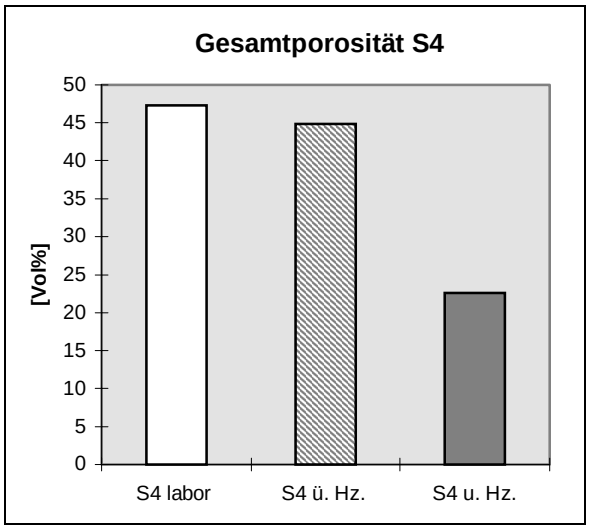


Abb. 28 und 29: Exemplarisch: expositionsbedingte Entwicklung der Porenvolumina und Vergleich der entsprechenden Porenfraktionen der rein mineralischen körperhaften Schlämme S1.



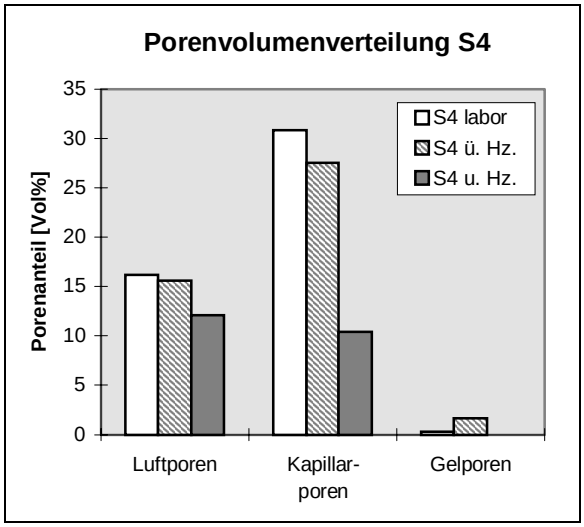


Abb. 30 und 31: Exemplarisch: expositionsbedingte Entwicklung der Porenvolumina und Vergleich der entsprechenden Porenfraktionen der körperhaften Schlämme S4 mit organischen Zusätzen.

Dieses Phänomen läßt sich wie folgt erklären:

a. Die unterschiedlichen Feuchtegehalte des tragenden Mauerwerkes liefern abweichende Carbonatisierungsbedingungen, die sich in der Ausbildung des Porenraumes bemerkbar machen. Hohe Feuchtegehalte bedingen unabhängig

vom Carbonatisierungsgrad eine leicht geringere Porosität, die sich auch in der Porenradienverteilung bemerkbar macht. Wird die Porenfraktion der Probe unterhalb der Horizontalsperre auf das Gesamtporenvolumen der Laborprobe normiert, zeigt sich nicht nur, daß der Kapillarporenanteil unter der Horizontalsperre niedriger ist, sondern der Luftporenanteil und der Gelporenanteil im Verhältnis etwas höher liegt. In den Untersuchungen von VAN BALEN 1991 und in weiteren Untersuchungen dieser Arbeit (Abschnitt 4.4.1) ist diese Tendenz ebenfalls zu erkennen. Identische Kalkmörteltypen weisen in vollständig carbonatisiertem Zustand eine von der Carbonatisierungsbedingung abhängige Porosität auf. Die Proben, die unter 86% rel. Luftfeuchtigkeit und CO_2-Atmosphäre (feucht) gelagert wurden, zeigen niedrigere Porenanteile, als die unter normalem Außenklima carbonatisierten Proben.

b. Im Ziegelmauerwerk vorhandene Salze werden über die Ziegeloberfläche durch die Kapillarporen der Schlämme in Richtung der Verdunstungsoberfläche transportiert. Die leicht löslichen Anteile werden oberflächennah ausgewaschen. Gips (geringer löslich) reichert sich mit der Zeit in den Kapillarporen (teilweise auch als Neubildung aus SO_2 der Luft und Bindemittel) an und führt zur Verkleinerung des Kapillarraumes. Auch die Salzanalyse der körperhaften Schlämmen bestätigt, daß im Gegensatz zum Untergrund tatsächlich Gips stark angereichert ist und die leichter löslichen Salze nur in sehr geringen Mengen vorhanden sind (vergl. Tabelle 5, folgender Abschnitt).

c. In Gegenwart höherer Feuchtegehalte funktioniert die Hydratation der hydraulischen oder puzzolanischen Anteile besser, was sich in der Zunahme der Gelporenanteils niederschlägt.

3.1.4.8 Salzaufnahmefähigkeit einiger körperhafter Schlämmen

Die gezielte Salzuntersuchung an einigen körperhaften Schlämmenproben (S1, S3, S5, S6 und S16) zeigt, daß die Systeme S1-S6 innerhalb von 2½ Jahren beachtliche Mengen an Salz (bis zu 6%) aufgenommen haben. Eine vereinfachte Gegenüberstellung der Salzgehalte oberflächennaher beschlämmter Ziegelbereiche und der entsprechenden Schlämmen ohne Ziegeluntergrund (aufgeteilt in Gesamtsalz- und reinen Gipsgehalt Tab. 5), zeigt folgendes: Die Salze gelangen über Kapillartransport aus dem Ziegel in die Poren der Schlämme, an deren Oberfläche die wasserlöslichen Salze ausgewaschen werden. Im Gegensatz zu den an Ziegeloberflächen (Bohrkern) ermittelten Salzkonzentrationen überwiegt

daher in den Schlämmen Gips.

Ein naheliegender Grund für die Anreicherung von Gips ergibt sich aufgrund der chemischen Reaktion der überwiegend kalkhaltigen Bindemittel mit dem SO_4^{2-}-haltigem Regenwasser. Darüber hinaus wurden aber von BRANDES & STADLBAUER 1995 auch Gipsanreicherungen im Porenraum von kapillaraktiven Beschichtungen nachgewiesen, deren Bindemittel keinen Kalk enthält.

Ein ‘Gipsstau’, das heißt eine starke Anreicherung von Gips direkt unter der nicht kapillar aktiven Beschichtung, der unter den Systemen S14 und S15 oberhalb der Horizontalsperre festgestellt wurde, ist unter den kapillar offenen Schlämmen nicht zu beobachten.

Tabelle 5: Vergleichende Salzgehalte einiger körperhaften Schlämmen im Vergleich zu den beschlämmten Ziegeloberflächen unter verschiedenen Systemen nach 2½ Jahren Standzeit:

Salzgehalt in Gew.-%	**S1 u. Hz.**	**S1 ü. Hz.**	**S3 u. Hz.**	**S3 ü. Hz.**	**S14 u. Hz.**	**S14 ü. Hz.**	**S15 u. Hz.**	**S15 ü. Hz.**
Ziegeloberfläche:								
gesamt	1,9	2,7	3,0	0,8	4,0	3,1	1,5	1,6
Gips	0,5	1,2	1,5	0,1	1,7	3,0	0,3	1,5
Schlämme:								
gesamt	5,9	3,7	5,7	5,0	-	-	-	-
Gips	5,0	3,1	3,5	4,7	-	-	-	-

u. Hz. = unterhalb der Horizontalsperre, ü. Hz. = oberhalb der Horizontalsperre

Daraus läßt sich folgendes ableiten:

bei den körperhaften Systemen wird ein kapillarer Salztransport bis in die Schlämme ermöglicht; so kann einer Salzanreicherung in den oberen Ziegelschichten vorgebeugt werden. Damit erfüllen die Systeme die Opferschichtfunktion.

Systeme, deren Feuchtetransport hingegen (fast) ausschließlich über die Dampfphase abläuft bedingen möglicherweise eine Anreicherung von Gips (u. a. Salzen) direkt unter der Schlämme, da der kapillare Salztransport durch den Ziegel dort endet. Schäden (Abplatzungen etc.) können die Folge sein.

3.1.4.9 Mikrobiologie

Über die Prüfzeit hinweg konnte eine jahreszeitlich bedingte Fluktuation der Mikroorganismen mit leicht steigender Tendenz beobachtet werden (BRAAMS & WARSCHEID 1993). Die Systeme mit organischen Bindemitteln, bzw. einer gewissen Wasserspeicherkapazität (körperhaft) zeigen höhere Besiedlungszahlen. An beimpften Laborproben war einzig bei S15 eine leichte Abnahme des s_d-Wertes zu verzeichnen. Da jedoch keine weiteren systematischen Untersuchungen in Bezug auf feuchtetechnische Veränderungen durch biologischen Abbau des Bindemittels vorliegen, muß die Frage der langfristigen biogenen Gefährdung der Schlämmen unbeantwortet bleiben.

3.1.5 Zusammenfassung

Nach 2½-jähriger Beobachtungsdauer lassen sich deutliche Unterschiede in der Wirksamkeit und Beständigkeit der einzelnen Schlämmensysteme auf der historischen Ziegelfassade erkennen. Die Eigenschaften sind nach der Bewitterung noch grob den Systemgruppen (a. körperhafte Schlämmen mit Opferschichtcharakter, b. Systeme mit Anstrichcharakter und c. wasserabweisend eingestellte Industrieprodukte) zuzuordnen. Da die gewonnenen Werte zwar im Einzelnen standortspezifisch sind, sich aber starke Tendenzen ablesen lassen, werden nachfolgend die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefaßt.

Kapillare Wasseraufnahme und Salzverträglichkeit:

Die körperhaften Schlämmensysteme auf Kalkbasis S1-S6 weisen nach 2½-jähriger Standzeit geringere w-Werte auf als in frischem Zustand. Sie sind zwar kapillar aktiv, besitzen jedoch genügend Körper, um die wesentlich stärker saugenden Untergrundeinflüsse abzuschirmen. Selbst bei andauernder Schlagregentätigkeit ist die aufgenommene Wassermenge nur durch den w-Wert der Schlämme bestimmt. Die Wasseraufnahme des Ziegels bleibt im Vergleich zum unbeschlämmten Zustand deutlich reduziert. Die oben genannte Abnahme der w-Werte über die Bewitterungszeit beruht auf der Einengung des Porenraums durch Salzablagerungen, fortschreitender Carbonatisierung und primärer Gipsbildung. Die Schlämmen stellen zusätzlich eine Opferschicht dar, die in gewissem Rahmen Salz einlagern kann, eine schädliche Salzanreicherung an der originalen Ziegeloberfläche verhindert und langsam von außen zurückwittert. Im

Falle eines gering- bis unbelasteten Untergrundes ist eine längere Standzeit zu erwarten.

Die Kalkschlämmen mit Anstrichcharakter S7-S12 zeigen im frischen Zustand eine stärkere Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme als S1-S6, verlieren diese Eigenschaft im Laufe der Zeit jedoch völlig. Ein bereits anfangs relativ hoher w-Wert steigt mit zunehmender Dauer des kapillaren Saugens bis hin zu den Werten des ungeschützten offenen Ziegels. Nach 2½ jähriger Bewitterungszeit ist keine wasserhemmende Wirkung mehr bei Schlagregenbelastung vorhanden. Da dies selbst auf relativ gering salzbelasteten Ziegeln festgestellt wurde (S10 und S11, Tabelle 6), kann davon ausgegangen werden, daß das Verhalten verwitterungsbedingt ist und nicht nur auf den problematischen Untergrund zurückgeführt werden darf.

Die Kalkschlämme S13 zeigt sowohl in frischem Zustand, als auch nach 2½ jähriger Standzeit einen sehr hohen Wasseraufnahmekoeffizienten. Dieses System ist nicht, wie vom Hersteller empfohlen, nachträglich hydrophobiert worden. Ein Feuchteschutz ist aufgrunddessen nicht vorhanden.

Die Dispersion-Silikat-Schlämme S14 läßt in seiner anfänglich hoch wasserabweisenden Eigenschaft nach und zeigt nach 2½ Jahren Verwitterung mit einem w-Wert von 0,8 kg/($m^2 \cdot \sqrt{h}$) nur eine wasserhemmende Wirkung. Dieses Verhalten könnte auf die aus der zweiten Schlämmenschicht herauswitternden Glimmer (Abbildung 20 und 21) zurückzuführen sein. Bei höheren Salzgehalten im Mauerwerk können Probleme durch sich unter der Schlämme anreichernde Salze entstehen.

Die gute Wasserabweisung der Schlämme aus Siliconharzemulsion S15 im frischen Zustand ist auch nach 2½ Jahren fast unverändert vorhanden (w-Wert < 0.1 kg/($m^2 \cdot \sqrt{h}$)). Selbst bei anhaltender Schlagregentätigkeit ist das Mauerwerk vor äußerer Feuchtigkeit geschützt. Auch hier wurden Salzanreicherungen unter der Schlämme festgestellt.

Die Schlämme auf Trasskalkbasis S16 konnte aufgrund extremen Absandens im Verlauf der Standzeit feuchtetechnisch nicht weiter untersucht werden. Die Funktion der Opferschicht ist auch hier erfüllt, die Fähigkeit, Salze aufzunehmen, ist in etwas geringerem Maß als in der Schlämmengruppe S1-S6 vorhanden. Da bereits kurz nach der Applikation ein starkes Absanden zu verzeichnen war, ist mit einer wesentlich kürzeren Standzeit als bei den Systemen S1-S6 zu rechnen.

Wasserdampf-Diffusionwiderstand und Trocknung:

Alle Schlämmensysteme (bis auf S15) weisen unbewittert einen sehr geringen Wasserdampf-Diffusionswiderstand auf. Es ist anzunehmen, daß trotz einer leichten Verdichtung des Porenraumes bei körperhaften Systemen (hauptsächlich Kapillarporen) der s_d-Wert der Beschichtung allgemein nur wenig zunimmt.

Über die kapillar offene Beschichtungen (hier: S1-S13 und S16) gelangt mehr Feuchtigkeit ins Mauerwerk (je nach hydrophober Einstellung auch weniger) als bei nicht kapillar aktiven Systemen. Im Gegensatz dazu wird allerdings die Trocknungsgeschwindigkeit der kapillar aktiven Systeme in der zweiten Trocknungsphase entscheidend durch den *kapillaren Wassertransport* bestimmt (KRISCHER 1992). Da der Feuchtehaushalt des Untergrundes bis auf wenige Ausnahmen (z. B. aufsteigende Mauerfeuchtigekeit, hygroskopische Salze) über die Beschichtung reguliert wird, ist es daher nötig beide Mechanismen (gasförmige und kapillare Trocknung) der kapillaren Wasseraufnahme gegenüberzustellen.

Über der Horizontalsperre ist die Trocknungsgeschwindigkeit der kapillar offenen, rein mineralischen Systeme hoch bis sehr hoch. Die von Restauratoren entwickelten Schlämmensysteme mit organischen Zusätzen zeigen ca. um den Faktor 10 geringere Trocknungsgeschwindigkeiten. Am stärksten behindert wird die Trocknung bei den Industriesystemen S14 und S15. Im Fall von S12 liegt eine Trocknungsblockade aufgrund großer Salzgehalte vor.

Unter der Horizontalsperre trocknen die Bohrkerne innerhalb des jeweiligen Systems in der Regel langsamer. Dies Verhalten ist auf wechselnde, bis zu 10-fach höhere Salzgehalte, besonders in oberflächennahen Bereichen der Bohrkerne zurückzuführen. Da unterhalb den Beschichtungen S4 und S10 wesentlich höhere Salzgehalte vorliegen als bei S14 und S15, wird bei diesen Systemen die Trocknung noch stärker behindert.

Tabelle 6: Wirksamkeit ausgewählter Beschichtungssysteme:

Schlämme Nr.	mittlerer w-Wert Testplättchen [kg/(m²√h)] **frisch**	mittlerer w-Wert 2½ Jahre [kg/(m²√h)] **bewittert**	s_d-Wert [m] Testplättchen **frisch**	s_d-Wert [m] Verbund Ziegel-Schlämme **bewittert**
1	4,1	3,9	0,015	9,0
3	5,2	2,3	0,004	8,4
4	3,5	2,1	0,001	14,0
6	4,0	3,6	0,005	11,1
8	1,5	12,1	0,010	13,6
10	1,5	12,8	0,009	13,6
11	1,8	12,4	0,014	19,0
12	1,7	11,5	0,022	28,0[1]
13	9,7	7,5	0,005	-
14	< 0,1	0,9	0,009	19,8
15	< 0,1	< 0,1	0,272	11,7
16	3,6	-	0,001	-

Schlämme Nr.	Trocknungs-geschwindigkeit ($v_{t75\%}$) BK [kg/(m²*h)] **bewittert**	Sättigungs-grad oberer BK-bereich bei 95% r.F. [%] **bewittert**	oberflächennaher Salzgehalt [Gew.-%] Gips	ges. Salz **bewittert**
1	0,192	27,2	1,2	2,9
3	0,027	-	-	-
4	0,015	21,5	0,1	3,1
6	0,034	-	-	-
8	0,087	-	-	-
10	0,014	3,7	0,4	0,5
11	0,038	5,4	0,6	0,8
12	0,002[1]	-	-	-
13	-	-	-	-
14	0,006	2,6	3,0	3,1
15	0,012	2,7	1,5	1,6
16	-	-	-	-

[1] hoher Gehalt an hygroskopischen Salzen, die Trocknungsbarriere wird zusätzlich durch einen deutlich höheren s_d-Wert als unterhalb der Horizontalsperre angedeutet. BK = Bohrkern

3.1.6 Schlußfolgerung/Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Objekte

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich zusammenfassend in Tabelle 7 darstellen. Aufgrund vergleichbarer Ergebnisse können die Kalk-Systeme S1-S6 und S7-S12 jeweils als Gruppen betrachtet werden. Weiterhin sind die Industrieprodukte repräsentativ für die jeweiligen Bindemittelsysteme.

Tabelle 7: Übergeordnete Eigenschaften der untersuchten Schlämmengruppen:

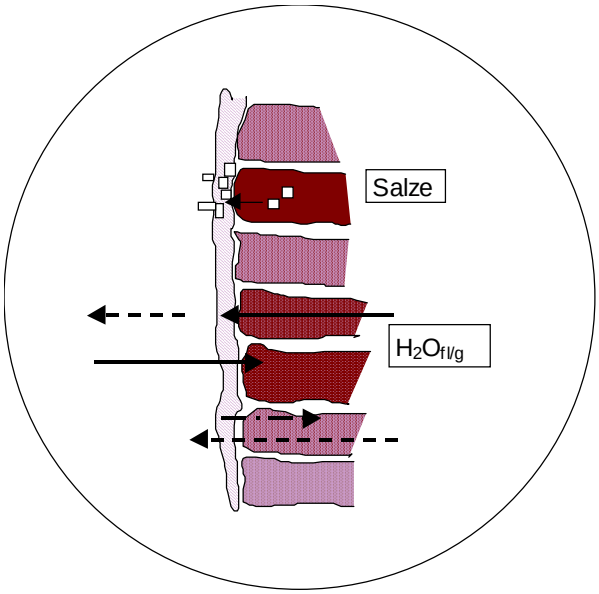
	Kapillare Wasseraufnahme		Wasserdampfdiffusionswiderstand		Trocknungsmechanismen		Vorraussichtliche Beständigkeit		Erforderliche Wartung und Pflege	
	niedrig	hoch	niedrig	hoch	kapillar	diffusiv	niedrig	hoch	niedrig	hoch
S1-S6		x	x		x	x		(x)		(x)
S7-S12		x x	x		x	x	x			xx
S13		x x	x		x	x	x			xx
S14	x		x			x		x	x	
S15	x		x			x		x	x	
S16		x	x		x	x	x			x

(...) =hoch/niedrig

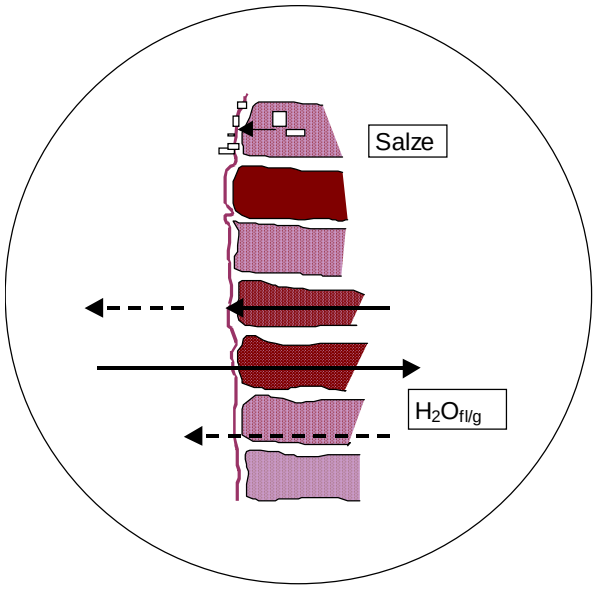
(+) = (...)er
\+ = (...)
++ = sehr (...)

Durch die in Tabelle 7 deutlich erkennbaren materialtechnischen Unterschiede zwischen den Kalk-Systemen und den ‘modernen’ Bindemittelsystemen wird ein weites Anwendungsspektrum eröffnet: Den besonders wartungsarmen, relativ gut beständigen und mit einem hohen Feuchteschutz ausgestatteten Systeme S14 und S15, stehen Kalk-Schlämmen mit generell höheren Wasseraufnahmen, aber auch besseren Trocknungseigenschaften und einer gewissen Salzaufnahmekapazität gegenüber.

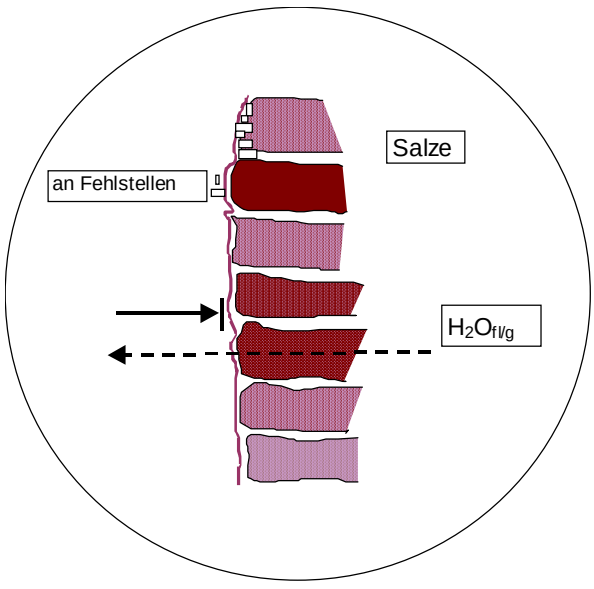
In problematischen Bereichen, wie beispielsweise der Sockelzone der ev. ref. Kirche in Eilsum, sind vor allem die *körperhaften*, salzspeicherfähigen Kalk-Systeme vorzuziehen. Der höhere Pflegeaufwand geht dem sicheren Erhalt der historischen Substanz einher. Gemessen an der Wasseraufnahme der originalen Ziegeloberfläche wird die eindringende Feuchtigkeit bereits deutlich reduziert. Steht nicht der historische Befund oder eine materialgetreue Sanierung des Mauerwerks



Schlämme 1-6; 16:
dickere 'Opferschicht'
- gewisse Salzaufnahmefähigkeit,
- Wasseraufnahme im Vergleich zum unbeschlämmten Ziegel deutlich reduziert



Schlämme 7-12; 13:
dünne 'Oberflächenschutzschicht',
- Wasseraufnahme im Vergleich zum unbeschlämmten Ziegel reduziert



Schlämme 14, 15:
dünne 'Oberflächenschutzschicht',
- Wasseraufnahme stark gehemmt bis unterbunden

Abb. 32: Schematische Einteilung der Schlämmeneigenschaften nach 2,5 Jahren Bewitterung

im Vordergrund, sondern in erster Linie der Schutz vor eindringender Feuchtigkeit, stellen moderne Systeme unter sehr geringer Salzbelastung eine wirksame und relativ pflegeleichte Alternative für die mittels Gerüst schwer zugänglichen Bereiche historischer Objekte dar, z.B. der Turm der Kirche in Eilsum. Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung eines langfristigen denkmalpflegerischen Konzeptes. Dieses muß sowohl ästhetische Kriterien erfüllen, als auch die notwendigen Schutzfunktionen der jeweiligen Behandlung berücksichtigen.

Anhand der Untersuchungsergebnisse zur Beständigkeit der verschiedenen Bindemittelsysteme in Freibewitterung können für die erforderlichen Wartungs- und Pflegezyklen folgende materialspezifische Zeiträume angegeben werden:

Kalksysteme zeigen je nach Belastungsfaktoren eine Beständigkeit von 1-10 Jahren, während die übrigen Systeme spätestens nach 5-10 Jahren kontrolliert werden müssen.

Die objektspezifischen Besonderheiten können durch das Anlegen von Testflächen wie an der Kirche in Eilsum ermittelt werden. Voraussetzung für eine richtige Maßnahme bleibt immer die gründliche Untersuchung des zu ‘therapierenden’ Objektes.

3.2 Komplexe Schichtfolgen im Innenraum – Fallbeispiel Campen und Lüne

In diesem Kapitel wird historische Wandmalerei als Beispiel von Mehrfachbeschichtungen auf Kalkbasis untersucht und vorgestellt.

3.2.1 Einleitung

Die meisten historischen Wandmalereien Westeuropas wurden in der Regel in Kalk-Technik ausgeführt, z. B. als Secco- oder Frescomalerei auf Kalkputz als Träger der Malschichten. Im Laufe der Jahrhunderte wurden Malereien zum Teil mehrfach übertüncht oder mit neuen, dem jeweiligen Zeitgeist entsprechenden Ausmalungen überdeckt. Das auch hier in der Regel verwendetete Bindemittel Kalk war teilweise mit organischen Zusätzen (Kasein, Leinöl, Ei etc.) versetzt, um die Beschichtung in unterschiedlicher Weise zu modifizieren.
Heute stellen die historischen aufeinanderfolgenden Malerei- und Tüncheschichten unterschiedlichster Zusammensetzung ein kompliziertes Gesamtsystem dar. Die ursprünglichen Schichteigenschaften sind durch langjährige bauphysikalische und baustoffchemische Einflüsse (Feuchte- und Salzbelastungen, Klimawechsel, statische Belastungen etc.) in den meisten Fällen stark verändert (MORA et al. 1984). Die durch Feuchte und Salz, bzw. Klimaveränderungen induzierten Schadensmechanismen sind in vielfacher Weise untersucht und beschrieben (ARNOLD & ZEHNDER 1989, TORRACA 1986). Dadurch entstandene Schäden reichen über den völligem Bindemittelverlust und das Abpudern sowie das Aufblättern der Malschichten bis hin zu partiellen Verdichtungen und Versinterungen des Putz- und Malereischichtverbandes.
Die Variation der verschiedenen Eigenschaften im Schichtverband bringt eine dem Gesamtsystem eigene feuchtetechnische Dynamik mit sich. Das Freilegen von Wandmalereien, bzw. Entfernen einer oder mehrerer Schichten aus diesem System, kann eine starke Veränderung der Dynamik in den oberflächennahen Schichten bewirken. Unter Umständen ist die bis dahin unter den Mehrfachbeschichtungen geschützte Wandmalerei zyklischer oberflächlicher Salzkristallisation, Feuchteeinfluss und/oder mikrobiellem Befall ausgesetzt. Negative Beispiele gibt es bedauerlicherweise häufig. Verschiedene Autoren berichten über die Erscheinungsbilder von geschädigten Wandmalereien, dem Umgang damit im Zuge der Bestandserfassung und der naturwissenschaftlichen Untersuchung der

Schadens-phänomene zusammengefaßt in den Bänden ‚Wandmalereischäden' (Hrsg.: MÖLLER 1990, SEGERS-GLOCKE 1994) der Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen. In jüngster Zeit wird die Freilegung von neu entdeckten historischen Wandmalereien daher zunehmend kontrovers diskutiert. Zu deutlich ist in den letzten Jahren geworden, daß für die Mehrzahl der Objekte auch die modernsten Konservierungstechniken die fortschreitende Schädigung in diesen Fällen nur verlangsamen können. AUTHENRIETH & TUREK 1992, 1994 geben für den Zerfall von Wandmalereien auf Grund vergleichender Untersuchungen detaillierte Zeitvorstellungen und weisen den sichernden Behandlungsmethoden häufig ein neuerliches Schadenspotential zu.

Aus vorangehend genannten Gründen ergibt sich nicht nur die Notwendigkeit der genauen Befunduntersuchung im Vorfeld von Restaurierungsmaßnahmen, sondern auch der Prüfung der dem Gesamtsystem eigenen feuchtetechnischen Dynamik. Im folgenden Kapitel werden Untersuchungen an zwei Objekten vorgestellt, die ausgewählt wurden, da deren von einander abweichende Wandmalereischäden unter ganz unterschiedlichen Rahmenbedingungen entstanden waren: Die Wandmalereien in der ev. ref. Kirche in Campen sind durch den küstennahen Standort einer starken Salz- und Feuchtebelastung ausgesetzt und als exemplarisch für den Typus der küstennahen norddeutschen Wandmalereien zu sehen. Die Wandmalereien im Refektorium des Kloster Lüne wurden auf gipshaltigen Mörteln appliziert. Die Untersuchungen wurden im Rahmen des aus Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen (Kapitel 0608 TG 74) finanzierten Forschungsprojektes „Nutzen oder Schaden durch Freilegen historischer Wandmalerei im Sinne der Substanzerhaltung" durchgeführt. Die Ziele des Forschungsprojektes waren in erster Linie die Zustandserfassung von verschiedenen Wandmalereien, die mehrfach überdeckt und wieder freigelegt wurden sowie die wissenschaftlich kontrollierte Freilegung von kleinen Probeflächen. Die Projektarbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit der Universität Oldenburg, AG Geomikrobiologie und der Fachhochschule Holzminden, Studiengang Restaurierung u. d. Leitung der niedersächsischen Denkmalfachbehörde (Institut für Denkmalpflege). Die Ergebnisse sind in dem Abschlußbericht (KÖNIGFELD & STADLBAUER 1997) zusammengefasst.

3.2.2 Objektbeschreibung

Die folgende Beschreibung ist in groben Zügen dem Abschlußbericht des Forschungsprojektes Nutzen oder Schaden durch Freilegen historischer Wandmalereien im Sinne der Substanzerhaltung (KÖNIGFELD & STADLBAUER 1997) entnommen.

- Krummhörn-Campen, Ldkr. Aurich, ev. ref. Kirche:
  Gewölbeausmalung des 13. Jahrhunderts.
  Bei der Restaurierung 1938/ 40 sind die zahlreichen, über der Originalmalerei liegenden Tünchen nur teilweise abgenommen worden.

- Lüneburg, Kloster Lüne, Refektorium:
  Wandmalerei des 15. Jahrhunderts.
  Teilweise freigelegt und unterschiedlich restauriert, teilweise noch mit Schlämmen der Renaissance- und Barockzeit überdeckt. Auf Grund von schon vorhandener schichtenparalleler mikrobieller Besiedlung und spannungsreichen Verhaltens der existenten Tünchen besteht besonderer Handlungsbedarf.

3.2.2.1 Ev. ref. Kirche in Campen/Ostfriesland

Die reformierte Kirche in Campen zählt zu den wertvollsten Baudenkmalen des an mittelalterlichen Kirchen reichen Ostfrieslands. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist sie um 1300 über rechteckigem Grundriß in Backstein erbaut worden. Es handelt sich um einen einschiffigen Bau mit drei annähernd quadratischen Jochen. Die mit Zierrippen unterlegten Domikalgewölbe zeigen nach Osten reicher werdende Maßwerkmuster.
Die Kirche ist eine der wenigen, die im Küstenbereich nahezu vollständig in der mittelalterlichen Konzeption und Substanz erhalten ist. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die dekorativen rotgrundigen Malereien, die die Gewölbe mit vielfältigen, teilweise von Ziegelmustern abgeleiteten Formen überziehen. Im Mitteljoch sind figürliche Darstellungen erhalten.
Aus den Kirchenrechnungsbüchern (seit 1685) geht hervor, daß das Bauwerk in nach-reformatorischer Zeit immer wieder gepflegt und gewartet worden ist. Bis kurz vor 1900 wurde der Innenraum regelmäßig neu getüncht. Bis dahin wird von einem relativ guten Zustand der Kirche berichtet, wobei er sich aber bereits seit der

zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in seinem Gesamteindruck zunehmend verschlechtert zu haben scheint. Erstmals 1877, dann erneut 1894 wird von Feuchtigkeitsflecken und Algenbildung auf den Wänden berichtet.
Zu Anfang des 20. Jahrhunderts traten gravierende Schäden an den Innenwändendurch Feuchteeinwirkungen auf, denen man 1901 mit dem Aufbringen eines Zementputzes mit anschließendem Teeranstrich auf den Wänden zu begegnen versuchte. Dadurch wurden die Probleme aber nicht beseitigt, sondern nur in höhere Wandteile verlagert.
In den dreißiger Jahren hatten die Schäden einen solchen Umfang angenommen, daß auf Initiative des Provinzialkonservators Instandsetzungsmaßnahmen konzipiert wurden. Sie erschöpften sich 1938 - 1940 schließlich aber vor allem in einer teilweisen Freilegung der mittelalterlichen Gewölbeausmalung in zwei Jochen durch den Restaurator M. Gotta aus Hannover, der anschließend die Gesamtfläche wieder übermalt hat. Auf den Wänden und im Gewölbe des Westjoches liegen jedoch noch flächendeckend zahlreiche Übermalungen auf der mittelalterlichen Wandmalerei.
Der bauliche Zustand verschlechterte sich in der Folge weiter, so daß durch Undichtigkeiten im Dach und insbesondere im Bereich des Westgiebels erhebliche Wassermengen in die Kirche eindringen konnten. Diese Feuchtigkeit hat Schäden verursacht, die auch heute noch an Wänden und Gewölben zu erkennen sind. Besonders betroffen sind das westliche Joch sowie alle Anschlußbereiche der Gewölbe an die Außenwände.
Bei Beginn der Untersuchungen zeigen sich folgende Schadensbilder:

- An den Wandflächen und in den Zwickelbereichen der Gewölbe durch Wassereinbrüche gelbliche Verfärbungen des weißen Anstrichs, Ablösungen des Wandputzes mit dem darunter liegenden Teeranstrich vom stark durchfeuchteten und versalzenen Ziegelmauerwerk, starke Salzausblühungen.
- In Bereichen mit statisch-konstruktiven Schäden Ablösungen des Putzes bis auf das Mauerwerk.
- Oberflächenversinterungen der Malereiflächen im Westgewölbe, teilweises Abblättern der Übermalungen Gottas und Selbstfreilegung originaler Wandmalereibereiche, flächenhafte Salzausblühungen.
- Umfassende Schleierbildung auf den Gewölbemalereien von Gotta, dadurch Verblassen der Farbwirkung und Verschwimmen der Konturen.

3.2.2.2 Kloster Lüne/Lüneburg, Refektorium

In dem ehemaligen Benediktinerinnenkloster, heute evangelischen Damenstift Lüne ist das Refektorium ein Raum von besonderer Bedeutung, dessen Ausstattung im wesentlichen auf die Neugestaltung unter Propst Schomaker (1493 - 1506) zurückgeht. Seit den 50er Jahren ist bekannt, daß sich auf der Ostwand eine wandfüllende spätgotische Malerei befindet, die durch mehrere übereinanderliegende Anstriche mit Bemalungen aus der Renaissance- und Barockzeit zum großen Teil verdeckt war. Auf der 22 m langen Wand erscheinen männliche und weibliche Heilige um Anna Selbdritt als zentraler Figur. Den Hintergrund füllt eine feine grüne Blattwerkornamentik mit Blütenknospen. Die künstlerische Handschrift sowie die stilistischen Eigenheiten lassen die Malerei der unmittelbaren Nähe der Lüneburger Malerwerkstatt des H. Levenstede zuordnen. Als Entstehungszeit ist das Ende des 15. Jahrhunderts anzunehmen.
Darunter liegt ein älterer, um 1400 zu datierender Malereibestand, dessen Fehlen unter dem rechten Teil ein Hinweis darauf ist, daß das Refektorium bis gegen 1500 durch eine Mauer unterteilt war.
Die Ostwand des Refektoriums ist in drei, restauratorisch unterschiedlich bearbeitete Abschnitte A, B und C unterteilt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen waren auf den Wandabschnitt C des Refektoriums konzentriert. Hier waren bis zum Beginn der Untersuchungen im Forschungsprojekt nur Sicherungen der jüngeren abscherenden Kalkschichten vorgenommen worden. In diesem Abschnitt droht durch weitere Selbstfreilegung ein Verlust der gemalten oberen Schichten der mittelalterlichen Wandmalerei. Besorgniserregend ist in diesem Bereich die starke Abgängigkeit des Grundputzes.

3.2.3 Vergleichende Untersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung

In diesem Kapitel werden die jeweiligen Schadensphänomene dargestellt und die Ursachen der Unterschiede in der objektabhängigen Entwicklung der schichtspezifischen Eigenschaften hergeleitet.

3.2.3.1 Ev. ref. Kirche in Campen/Ostfriesland

Der Innenbau zeigt starke Feuchte- und Salzschäden. Die größten Schäden befinden sich im Westjoch (insbesondere im Gewölbe teilweise Selbstfreilegung bis auf die Erstausmalung) sowie an den Nordwänden des Mittel- und Ostjoches.
Der Durchfeuchtungsgrad des Mauerwerks beträgt im bodennahen Bereich bis zu 100%. Aufsteigende Mauerfeuchte hat zu einer Salzverteilung über die gesamten Wandflächen geführt. Der zweimalige Versuch einer Innenabdichtung mit Hilfe einer überputzten Teerschicht in der Sockelzone (1902, 1974) hat den Transport der Salze in höhere Wandbereiche begünstigt. Selbst im Gewölbebereich sind hohe Salzkonzentrationen zu finden. Sie liegen beispielsweise in Form eines „Weißschleiers“ aus feinkristallinem $CaSO_4$ und $NaNO_3$ auf der jüngsten Innenausmalung (Gotta, 1933-38). An der Nordwand befinden sich großflächige Na_2CO_3-Ausblühungen und am Gesims des Westfensters Na_2SO_4- sowie $CaSO_4$-Ausblühungen. Außergewöhnlich hohe Salzbelastungen wurden weiterhin im Bauschutt des Dachraumes im Bereich der Gewölbezwickel festgestellt. Besonders hohe Gehalte an hygroskopischen Salzen (Hauptbestandteile Ca^{2+}, Na^{+}, NO_3^{-}, Cl^{-}, siehe Anhang) wurden im Zwickelbereich zwischen Westjoch-Gewölbe und westlicher Außenwand gefunden. Aufgrund der Salzuntersuchungen gilt als gesichert, daß die Feuchtigkeit im Mauerwerk der Kirche vor allem in den höheren Mauerwerkspartien zusätzlich zur aufsteigenden Feuchte auf hohe Konzentrationen hygroskopischer Salze zurückzuführen ist (BLÖCHL & STADLBAUER 1995).

3.2.3.2 Kloster Lüne/Lüneburg, Refektorium

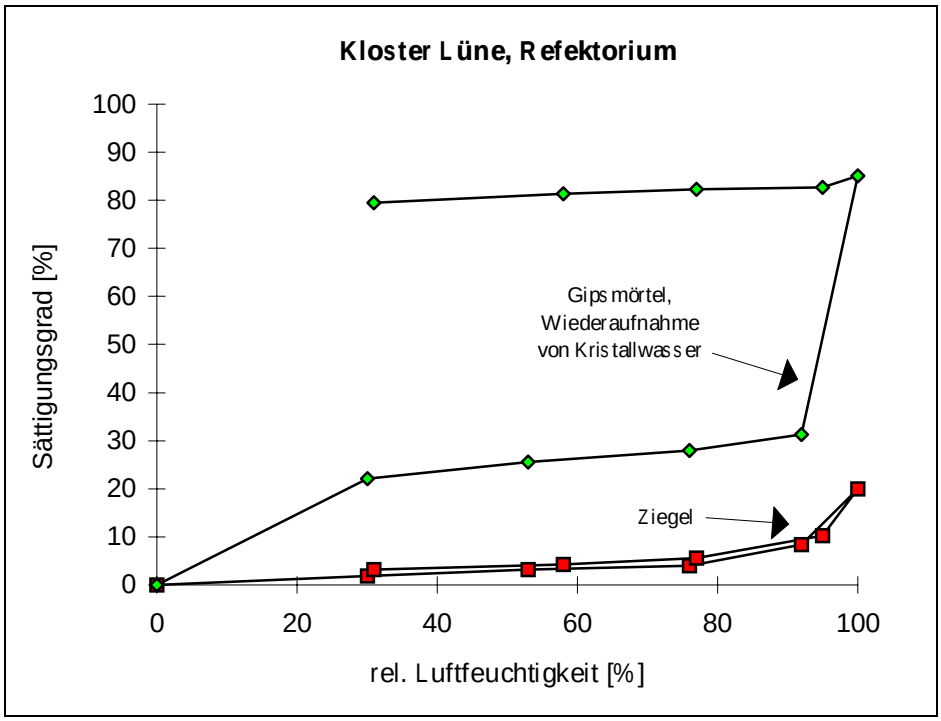
Salz- und Feuchteuntersuchungen an Bohrkernen und Bohrmehl (aus nicht bemalten Wandflächen und aus Fehlstellen) sowie Salzanalysen an Oberflächenproben (Anhang) verdeutlichen, daß der partielle und unterschiedlich tiefgreifende Malschichtverlust an den Wandmalereien im Refektorium (in Wandabschnitt C)

eindeutig nicht auf den bekannten Prozeß der aufsteigenden Mauerfeuchte zurückzuführen ist.

Die Mauerfeuchtigkeit ist allgemein niedrig (zwischen 1-2 M.-%) und selbst im Baugrund zeigen die Sandproben nur max. 3 M.-% Feuchte. Zusätzlich zeigen die untersuchten Proben einen sehr geringen Gehalt an wasserlöslichen Salzen (unter 2 mg/g Festsubstanz bzw. < 0,2 M.-%), der nur auf dem Bodenniveau etwas ansteigt und leicht erhöhte K^+-, Na^+- und Mg^{2+}-Gehalte aufweist (siehe Anhang).

Das Sorptionsverhalten von gezielt entnommenen Materialproben zeigt die hygroskopische Wasseraufnahme des porösen Systems in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Feuchtesorption der Proben ist in erster Linie eine Funktion der Porosität (bzw. der Porenradienverteilung) und der Salzbelastung (nur hygroskopische Salze). Der Verlauf der Sorptionsisothermen der Mauerwerksprobe aus der Ostwand des Refektoriums in Abbildung 33 ist charakteristisch für eine Ziegelprobe mit sehr geringer Salzbelastung. Der leichte Anstieg bei höheren Luftfeuchten ist allein auf die Kapillarkondensation in den Mikroporen zurückzuführen.

Vergleicht man dazu die Sorptionsisothermen von Proben aus der Kirche in Campen (Abbildung 34), so fällt die starke Wasseraufnahme bei höheren Luftfeuchtigkeiten auf. Diese Proben sind stark salzbelastet, wobei hygroskopische Salze den größten Anteil bestimmen. Das Schichtpaket aus dem Bereich der Südwand erreicht bei der Lagerung unter 97% rel. Luftfeuchtigkeit annähernd 100% des Sättigungsgrades.



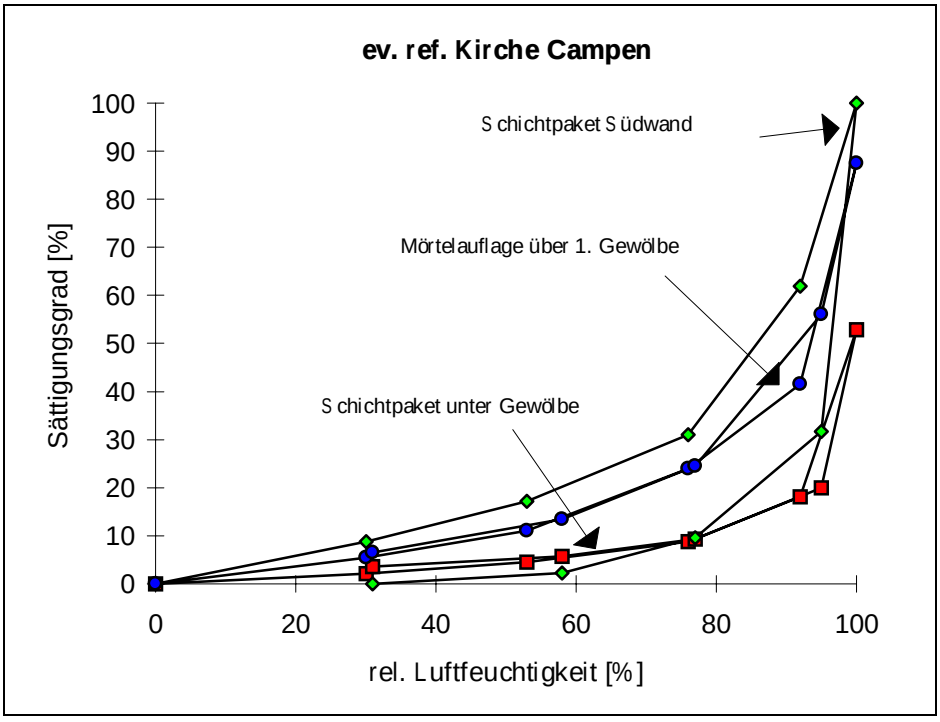


Abb. 33 u. 34: Vergleich der Sorptionsisothermen von Wandproben (bei 105 °C getrocknet) aus dem Refektorium des Kloster Lüne und aus dem 1. Joch der ev. ref. Kirche Campen. Der starke Anstieg der Isotherme des Gipsmörtels beruht auf dem reversiblen Einbau von Kristallwasser des bei 105 °C getrockneten Gipsmörtels bei höheren Luftfeuchtigkeiten.

3.2.3.3 Folgerung

Aus den vorangehend beschriebenen Untersuchungen ergibt sich für den Wandbereich der ev. ref. Kirche in Campen, neben einer genauen Befunduntersuchung, die dringende Notwendigkeit der feuchtetechnischen Untersuchung der einzelnen Schichteigenschaften, da diese mit Sicherheit aufgrund der jahrhundertlangen andauernden Feuchte- und (vor allem) Salzbelastung einer gefährdenden Schadensdynamik ausgesetzt sind.
Im Falle der Ostwand des Refektoriums/Kloster Lüne Wandteil C ist nicht mit einer durch Salz- und Feuchtebelastung induzierten Schadensdynamik zu rechnen. Hier gibt bereits die Untersuchung der Zusammensetzung der einzelnen Schichten und deren Verbund Aufschluß über die Schadensursache, die in der malereispezifischen Charakteristik bzw. statischen Randbedingungen zu finden ist.

3.2.4 Differenzierte Betrachtung der Schichteigenschaften

3.2.4.1 Ev. ref. Kirche Campen

Detailbetrachtung der Schichtabfolge am Beispiel des Westjochs/Südwand:

Abb. 35: Ausschnitt eines Anschliffs der Schichtenabfolge Südwand ev. ref. Kirche in Campen, Südwand unter dem Westjoch

Die mikroskopische Auswertung von Anschliffen einiger Proben aus dem Wandbereich (Beispiel Abbildung 35) zeigt, daß teilweise mehr als 25 verschiedene Schichten übereinander vorliegen. Sie unterscheiden sich in Struktur, Dicke und Zusammensetzung. Detaillierte stratigrafische Untersuchungen zur Schichtenfolge der Wand- und Gewölbefassungen in Campen führten zur gezielten Entnahme geringer Probenmengen mittels Skalpell. Dabei wurden von einer Arbeitsgruppe der FH Hildesheim Studiengang Restaurierung unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Schädler-Saub treppenartig ca. 6 x 1 cm kleine Felder angelegt, die Schicht für Schicht über den Putz bis auf den Ziegel abgetragen wurden. Diese Proben dienten zur Feststellung der Beschaffenheit der einzelnen Schichten, der mikrochemischen Prüfung der schichtspezifischen Bindemittelsysteme nach SCHRAMM & HERING 1988 sowie der Besiedelung durch Mikroorganismen (vgl. Tabelle 8). Anhand dieser gezielt freigelegten stratigrafischen Fenster (Abbildung 36) konnte der Aufbau und die Abfolge der verschiedenen Innenraumfassungen geklärt werden.

Abb. 36: Ansicht des freigelegten stratigrafischen Fensters an der Südwand der Kirche in Campen.

Tabelle 8: Untersuchter Bereich: Wandabschnitt der Südwand angrenzend an den Schildbogen

Probenkennzeichnung: C2-IH-2

Schicht -folge Fenster	Beschreibung, Mikrobiologie	Zustands-beschreibung, Bindemittel	Schichtfolge nach Anschliff	Datierung
25	weiß, stark gelb gefärbt	dünn, weich, feucht N, JKJ, K	42.	1971
24	weiß, stark gelb gefärbt	dünn, weich, feucht N,JKJ	39.- 41.	1938-1935
23	braun, Tünche mit sichtbarem Pinselduktus	weich JKJ, K	38	1911
22	braun-ockrig, zweischichtig, haftet an 2c; darunter gelbl. Schicht, die an 2e haftet	dünn, feucht JKJ	37	1910
21	grau (zweischichtig)	weich, pudrig, feucht JKJ	35. - 36.?	1909-1908
20	weiß (zweischichtig)	dünn, feucht, gut anhaftend N, JKJ	33. - 34.?	1905-1902
19	weiß-ocker	dünn, feucht, gut N, JKJ	32.	1902
18	schwarz (Bitumen-schicht, die in 2i und 2k eingedrungen ist)	glänzend, "schwitzt", gut anhaftend, dünn N	31.	1902
17	grau-braun P	dünn, vermutl. gedünnt, Spuren von Braunfär-bung	29. - 30.	
16	weiß	feucht, instabil, schlecht anhaftend K	24. - 28.	
15	weiß (zweischichtig, kaum trennbar)	feucht, gut anhaftend	nicht genau aufzutrennen	
14	grau-blau, hell	feucht, schlecht anhaftend N, K	23.	
13	grau-blau (mit sichtbarem Pinselduk-tus) P	sehr dünn, gut anhaftend	22.	

Fortsetzung Tabelle 8:

12	weiß/ grau-blau (weiß event. als Grundierung zu 2n; nicht zu trennen)	gut anhaftend	21.	
11	weiß B	fest, gut anhaftend	20.	
10	grau-blau B	dünn, gute Haftung	19.	
9	weiß grau-blau event. als Grundierung für 2q	(keine Probe, zu dünn, gut haftend)	18.	
8	ocker-weiß sehr harte Schicht B, P	zweischichtig, nicht zu trennen, gut haftend	nicht genau aufzutrennen	
7	weiß, mehrschichtig B	normale Bindung, feucht, dick, zwei-schichtig	nicht genau aufzutrennen	
6	weiße u. schwarze Dekoration B	K	nicht genau aufzutrennen	
5	Weiß B	harte Sinterschicht N, K	nicht genau aufzutrennen	
4	weiß-ockrig B	harte Sinterschicht N, K	nicht genau aufzutrennen	
3	Grau B, P	dick, feucht mit Kalkspatzen, Holzkohle, weich N, K	nicht genau aufzutrennen	
2	weiß-ockrig B	zweischichtig, Sinter?, dick K	2.	
1	ockrig	Sinter, sehr hart dünn, gut am Putz haftend feucht N	1.	
0	Putz B	lose Bindung, ca. 3mm feinkörnig, gute Haftung am Ziegel N, KJK, K	-	
	Ziegel		-	

B = Bakterien
P = Pilze
A = Aktinomyceten

N= positiver Stickstoffnachweis
K = positiver Kohlenhydratnachweis
KJK = positiver Stärkenachweis

3.2.4.2 Fortschreitende Entwicklung hygrischer Eigenschaften freigelegter Tüncheschichten:

Nach der treppenartigen Freilegung der einzelnen Schichten bis auf den Ziegel konnten deren feuchtetechnischen Eigenschaften unabhängig voneinander überprüft werden. Mit einer Mikropipette wurde ein definierter Tropfen Wasser (20 µl) auf die Schicht aufgebracht und die Zeit notiert, die das kapillare Saugen der Schicht bis zum völligen Verschwinden des Tropfens benötigt. Bereits am Tag der Freilegung waren deutliche schichtspezifische Unterschiede zu verzeichnen. (Abbildung 37).

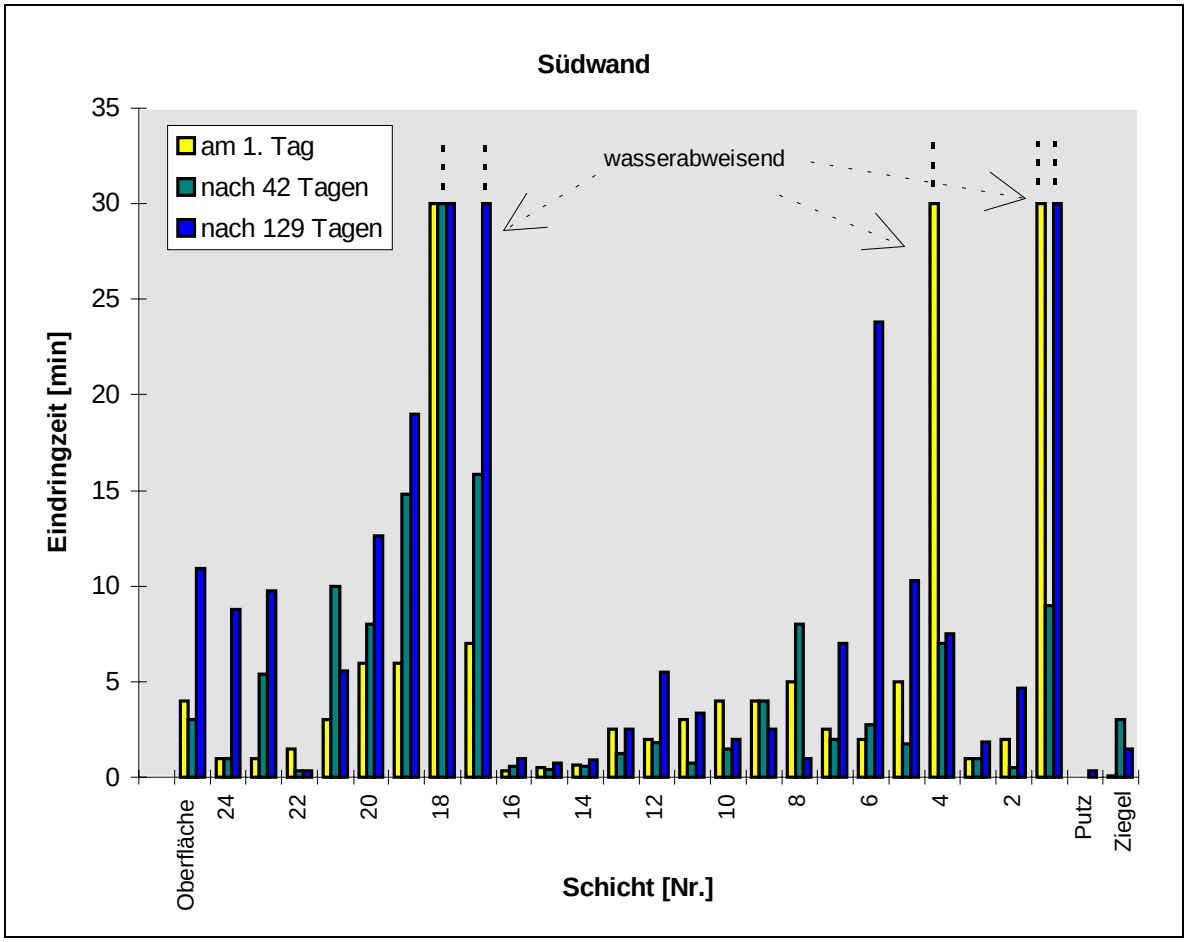


Abb. 37: Schichtspezifische Ermittlung der Wasseraufnahme bzw. Wasserabweisung unter Verwendung von 20 µl-Tröpfchen; Westjoch/Südwand der Kirche in Campen mit insgesamt 25 trennbaren Schichten auf einem Putzträger.

Die Eindringgeschwindigkeiten des aufgetragenen 20 µl Tropfens Wasser variieren zwischen den einzelnen Schichten stark. So zeigen einzelne Schichten sehr starke Kapillarwirkung (bei Schichtnr. 14, 15, 16 beträgt die Eindringzeit nur wenige Sekunden), während insbesondere die durch Kalk- und Gipssinterbildung

(Schichtnr. 4 und 1, REM-Aufnahme in Abbildung 38 und 40) verdichteten Schichten nahezu wasserabweisend wirken.

Besonders interessant ist die ausgeprägte Veränderung der Wasser-Eindringzeiten innerhalb des rund 4-monatigen Beobachtungszeitraums: Die Wasseraufnahme der freigelegten Schichten wird in relativ kurzer Zeit stark verändert, wobei der generelle Trend auf eine sukzessive Verringerung der Wasserdurchlässigkeit (Erhöhung der Eindringzeiten) hindeutet. Dies kann unter anderem auf eine starke Anreicherung von Salzen in den jeweiligen Schichten zurückgeführt werden, wodurch der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient reduziert wird (GARRECHT 1992).

Bei der genauen Betrachtung der Eindringgeschwindigkeiten in Abbildung 37 ist eine sich wiederholende Systematik festzustellen: Jeweils vor (vom Rauminneren/Oberfläche aus gesehen) den wasserabweisenden, „sperrenden“ Schichten nimmt die Standzeit des Tropfens von Schicht zu Schicht kontinuierlich zu, während die geringsten Eindringzeiten (stärkste Wasseraufnahme) generell hinter den ‘sperrenden’ Schichten (Schichtnr. 1, 4, 17 und 18) vorliegen.

Diese feuchtetechnisch differenzierte Schichtabfolge läßt sich strukturell anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen an folgendem Beispiel nachvollziehen:

Dem hochporösen, direkt auf den Ziegel aufgebrachten Putz folgt direkt eine dichte Sinterschicht. In Abbildung 38 ist der erste Übergang des Putzes zur Sinterschicht (entspricht Schicht Nr.1 in Abbildung 37), zu sehen. Die Versinterungen im Anschlußbereich des Putzes bestehen in erster Linie noch aus Calcit (Abbildung 39), während sie zunehmend in Richtung der Verdunstungsoberfläche Innenwand zunehmend gipsreicher werden (Abbildung 40). Auf die dichte, harte und wasserundurchlässige Sinterschicht (Schichtnr. 1, Tabelle 8 und Abbildung 37) folgt nach einer offenporigeren Schicht (Schichtnr. 2) eine weiche poröse Beschichtung (Schichtnr. 3, Tabelle 8), die von Pilzen befallen ist (Abbildung 41). Die Wasseraufnahme dieser zwei Schichten ist sehr hoch. Mit abnehmender Wasseraufnahmefähigkeit der nächsten Schicht (Schichtnr. 4) geht auch die Verdichtung der Struktur bedingt durch die Ablagerung von Gips einher (vergl. Abbildung 42).

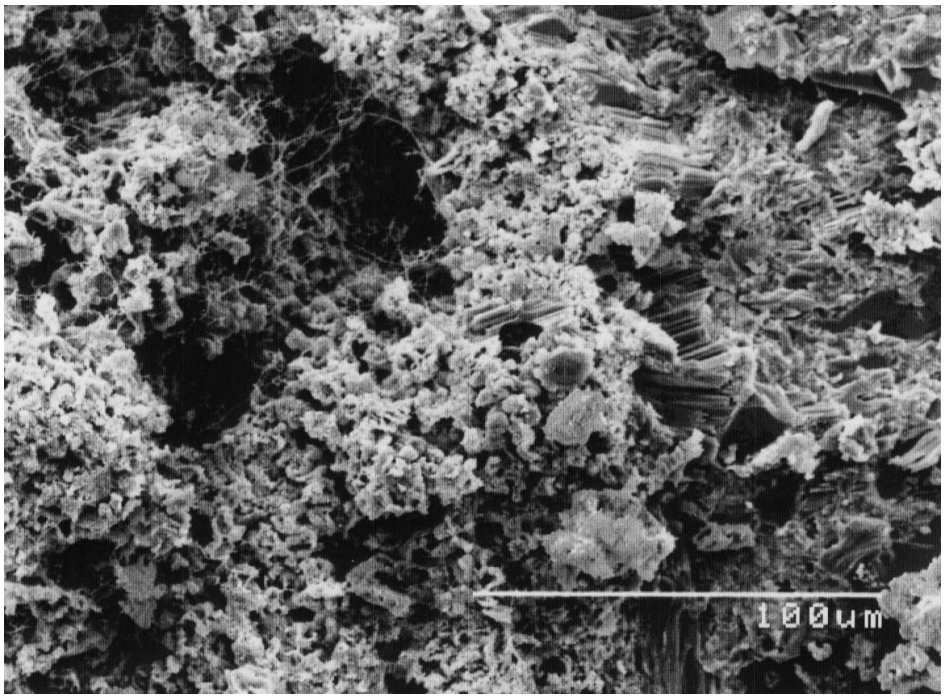


Abb. 38: REM-Aufnahme Südwand, ev. ref. Kirche in Campen. Im Übergangsbereich zu Schicht Nr. 1 zeigen sich erste Versinterungen im porösen Putz.

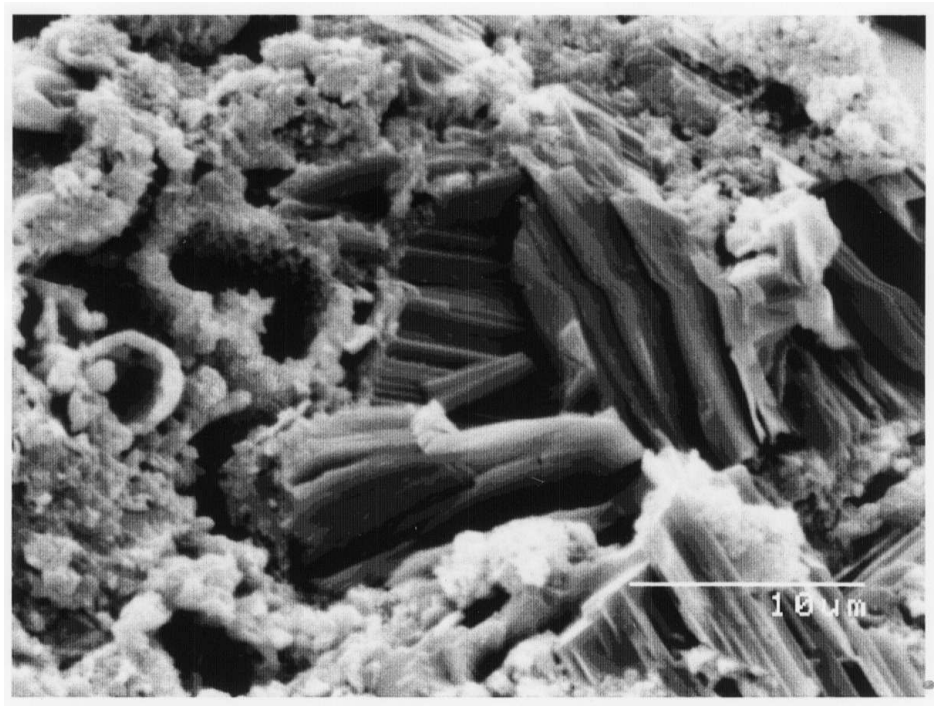


Abb. 39: REM-Aufnahme. Im Grenzbereich zum Putz besteht die Sinterschicht (Schicht Nr. 1) größtenteils aus Calcit. (Südwand, ev. ref. Kirche in Campen)

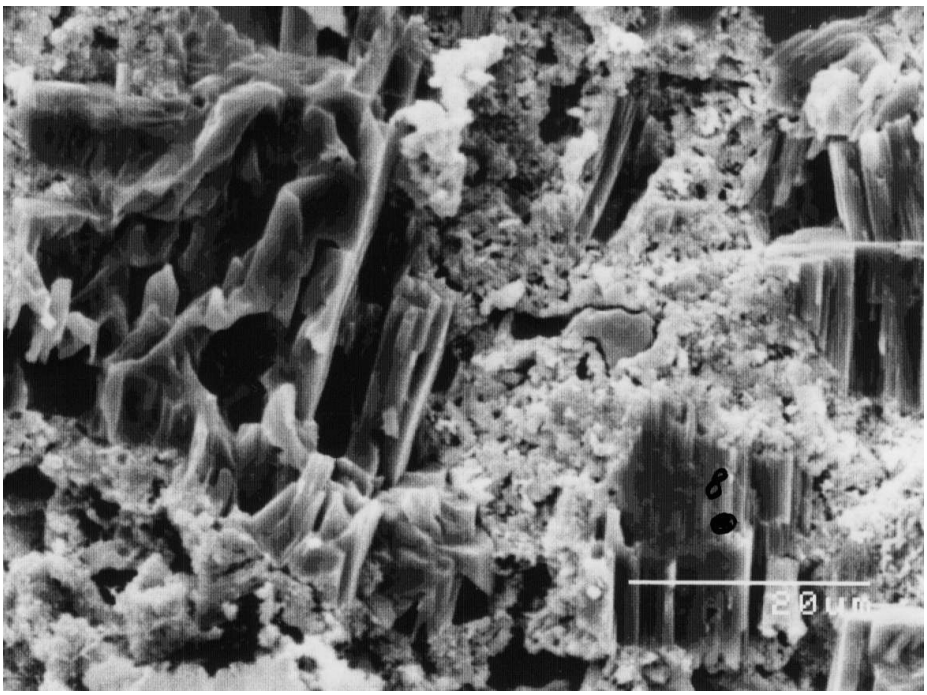


Abb. 40: REM-Aufnahme von Schicht Nr. 2. Die dichte Sinterschicht wird in Richtung Verdunstungsoberfläche gipsreicher. (Südwand, Kirche in Campen)

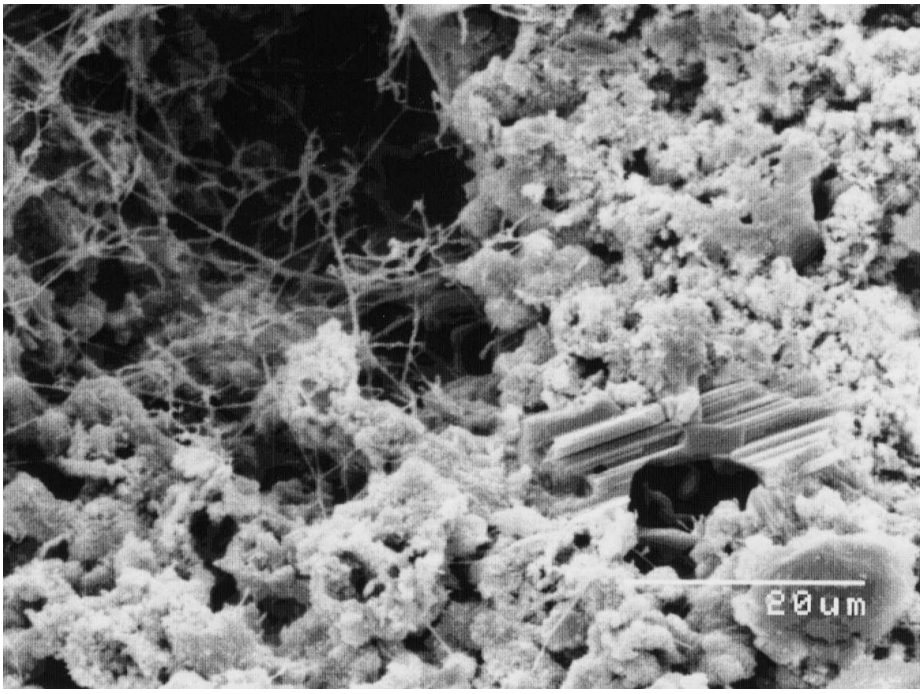


Abb. 41: REM-Aufnahme von Schicht Nr. 3. Im Anschluß an die dichte Sinterschicht schließt sich eine poröse, mit Pilzhyphen durchzogene Schicht an. (Südwand, Kirche in Campen)

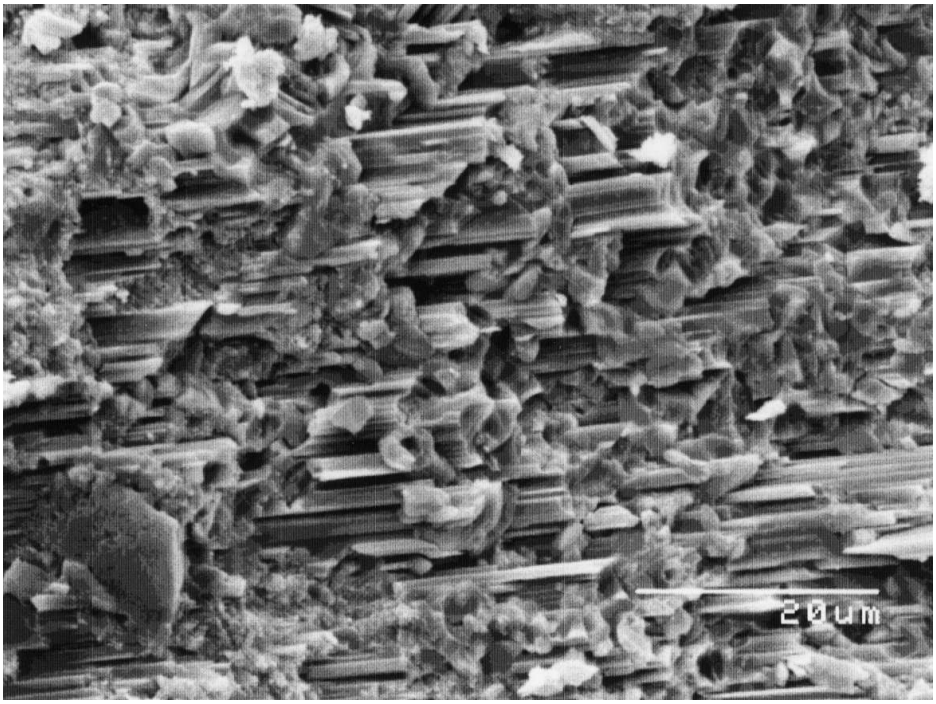


Abb. 42: REM-Aufnahme. Schicht Nr. 4 zeigt durch höhere Gipsanteile wieder etwas dichtere Eigenschaften. (Südwand, ev. ref. Kirche in Campen)

Die sehr durchlässigen Schichten wurden bei der Freilegung von den Restauratoren mit den Begriffen „feucht, weich, schlecht anhaftend, lose Bindung..." charakterisiert, die weniger durchlässigen Schichten häufig als „hart und spröde" (vgl. Tabelle 8). In beiden Fällen handelt es sich um Zustände, die sich im Schichtverband über längere Zeit eingestellt haben. Im Falle der „aufgeweichten" Schichten ist davon auszugehen, daß diese Schädigung auf ungünstige Wechselwirkungen mit den benachbarten sperrenden Schichten zurückgeht. Neben unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften spielt hier die Behinderung des Feuchtetransports und auch damit verbundener mikrobieller Befall eine ganz wesentliche Rolle. Die Dynamik einer fortschreitenden Sinterbildung läßt sich an der Darstellung der *zeitlich veränderten* Wasseraufnahme (Abbildung 37) gut nachvollziehen:

Wenn im Schichtverband sperrende Lagen auftreten (z.B. Schichten 17 und 18), so nimmt die Wasserdurchlässigkeit der folgenden Schichten (19 bis 25) in Richtung der Wandoberfläche allmählich zu, während der Versinterungsgrad dieser Schichten von innen nach außen allmählich abnimmt.

Die mikrochemische Bindemitteluntersuchung der sperrenden Schichten zeigt deutlich erhöhte organische Bindemittelanteile im Gegensatz zu den überwiegend mineralischen und kapillar aktiven Kalkschichten (siehe Tabelle 8).

Durch diesen Materialwechsel in der Schichtenfolge, beispielsweise der Wechsel

von einem reinen Kalksystem zu leinöl- oder kalkkaseinhaltigen Systemen, (siehe auch Kapitel 4.2) entstehen feuchtetechnische Gradienten durch sprunghaft veränderte Wasser- und Wasserdampf-Durchlässigkeit an Grenzflächen. Die dadurch schichtspezifisch unterschiedliche Migration der oft salzbelasteten Mauerfeuchte sowie die Lösung und Fällung der schwerer wasserlöslichen Bestandteile Kalk (Löslichkeit 15 mg/l) und Gips (Löslichkeit 2 g/l) können zur Abbildungung ausgeprägter Sinterschichten führen. Diese stellen häufig, wie das Beispiel der Schichtabfolge der Südwand in der Kirche in Campen verdeutlicht, spätestens im Falle einer Freilegung einen weiteren ernst zu nehmenden Schadensfaktor dar.

3.2.4.3 Kloster Lüne

Detailbetrachtung der Schichtabfolge am Beispiel der Ostwand des Refektoriums:
Die Schadensphänomene im Wandabschnitt C der Ostwand des Refektoriums sind nicht auf Feuchte- und Salzbelastungen zurückzuführen. Hohlräume zwischen Putz und Mauerwerk, damit verbundene Abplatzungen innerhalb der Malschichten sowie Schäden, die auf frühere bauliche Maßnahmen und verwendete Materialien zurückgehen, wurden innerhalb ausführlicher restauratorischer Untersuchungen kartiert und analysiert (OLDENBURG 1994). Sie beruhen auf statischen Veränderungen (Neigung der Wand, Einbau eines Gewölbes) und dem ursprünglichem Verputzen der glatten Ziegelwand ohne Rauhputz. Darauf beruht vermutlich die unzureichende Haftung sowie die Schwachstellen in dem mehrschichtigen Aufbau der spätgotischen Rankenmalerei, über die eine gut haftende Zwischenputzschlämme aufgetragen ist. Das darüber liegende stabile Schichtenpaket zeichnet sich durch einen relatv hohen Proteingehalt aus. Durch die darin begründete Festigkeit können vermehrt Spannungen auftreten, die zum Abschalen innerhalb der Rankenmalerei führen (vergl. auch Kapitel 4.2).

Malschichtaufbau im Wandabschnitt C (OLDENBURG 1994):

0. Gipsputz
1. Rankenmalerei um 1497
2. Zwischenputzschlämme um 1560
3. weiß-gelbliche Schicht
4. 1. Renaissancemalerei
5. 2. Renaissancemalerei
6. Barocke Säulenmalerei um 1665
7. zwei weiße Teilanstriche

OLDENBURG 1994 gelangt zu dem Ergebnis, daß der vorliegende Zustand einer unterschiedlich tief reichenden Selbstfreilegung der verschiedenen Malschichten eine weitgehende Stabilisierung erreicht hat. Die Konservierung des Ist-Zustandes zur Erhaltung des dort noch vorhandenen vollständigen Malschichtaufbaus sei mit vertretbarem Aufwand möglich, wird vom Eigentümer sowie den zuständigen Behörden befürwortet und zur Zeit ausgeführt.

3.2.5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Am Beispiel der beiden vorgestellten Objekte wird deutlich, daß die Prüfung der historischen und standortspezifischen Entwicklung der Schadensphänomene im Vorfeld von Restaurierungsmaßnahmen unverzichtbar ist. Erst aus diesen Untersuchungen läßt sich der folgende Handlungsbedarf abschätzen und bei Bedarf durch spezielle weiterführende Versuche, beispielsweise zur Änderung feuchtetechnischer Eigenschaften, ergänzen. So lassen sich im Fall des Wandabschnittes C der Ostwand Refektorium/Kloster Lüne die restauratorischen Maßnahmen aufgrund fehlender Feuchte- und Salzbelastungen auf einen rein malereispezifischen Bereich beschränken.
Die Situation der Kirche in Campen stellt ein deutlich größeres Problem dar. Die Schäden sind in erster Linie auf eine weiterhin vorhandene hohe Feuchte- und Salzbelastung zurückzuführen. Nach der treppenartigen Freilegung von mehr als vierzig (davon 25 trennbare) auf Kalk basierender Tüncheschichten bis auf den Ziegel zeigt sich eine ernstzunehmende Schadensdynamik. Innerhalb historisch betrachtet minimaler Zeitspannen sind schichtspezifisch starke Veränderungen in den feuchtetechnischen Eigenschaften festzustellen, anhand derer sich Schadensprognosen aufstellen lassen: Im Falle einer vollständigen Freilegung des

Innenraums bis auf die fortschreitend wasserundurchlässiger werdende Schicht 17 (vergl. Abbildung 37) ist beispielsweise davon auszugehen, daß die weichen instabilen Tünchen darunter (Nr.16, 15, 14, Tabelle 8) keine ausreichende Trag- und Haftfähigkeit aufweisen. Der relativ schnelle Verlust dieser neu geschaffenen Oberfläche, insbesondere bei den jahreszeitlich und auch nutzungsbedingt unvermeidlichen Klimawechseln und damit verbundenen Salzanreicherungen ist vorprogrammiert.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse und unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse aus der Erfassung der mittelalterlichen Wandmalereien in Niedersachsen (GROTE et al. 1994) können einige generelle Schlüsse gezogen werden, die vor anstehenden Freilegungen unbedingt zu berücksichtigen sind:

- Die Feuchtigkeit ist der größte Schadensfaktor. In Verbindung mit bauschädlichen Salzen und/oder mikrobiellem Befall bildet Feuchtigkeit (in Form von aufsteigender Mauerfeuchte oder Kondensationsfeuchte) den stärksten Motor für Schadensphänomene wie Ausblühungen, Abplatzungen, Schalenbildung, Versinterungen, Vergipsungen und den Bindemittelverlust durch mikrobiellen Abbau.
- Gezielte Untersuchungen zu baustoffchemischen und -physikalischen Fragestellungen sowie die genaue Bestandserfassung und Zustandsbeschreibung des Objekts (Feuchte, Salz, Mikrobiologie, Statik) ermöglichen eine weitgehende Eingrenzung der Schadensursachen und -mechanismen und bilden somit eine wichtige Entscheidungsgrundlage für weiterführende Maßnahmen am Objekt.
- In vielen Fällen lassen sich beträchtliche "Vorschädigungen" der Wandmalereien aus der Zeit vor ihrer Überdeckung nachweisen oder die Überfassungen wurden in der Regel als irreversible bzw. nur bedingt reversible Systeme aufgebracht.

In Abhängigkeit von standortspezifischen Randbedingungen können durch Eingriffe in eine komplexe Schichtenfolge unterschiedlichste Prozesse ausgelöst werden. Diese und ähnliche im Vorfeld prüfbaren Prozesse können bei einer Freilegung historischer Wandmalereien zu irreparablen Schäden führen. Eine Vielzahl der heutigen Schäden (bedingt durch frühe ungeeignete restauratorische Eingriffe) wären mit diesen Erkenntnissen zu verhindern gewesen. Als trauriges Beispiel aus der Praxis sei an dieser Stelle der Fall „Eilsum“ genannt (RÖSCH & SCHWARZ 1994; AUTHENRIETH & TUREK 1994).

Die Entscheidung für oder gegen Freilegung historischer Wandmalereien darf

daher nur nach gründlichen naturwissenschaftlich-restauratorischen Befunduntersuchungen und einer genauen Analyse der Schichteigenschaften erfolgen. Gemessen an dem möglicherweise verhinderten Schaden sind die in dieser Arbeit exemplarisch beschriebenen Untersuchungen im Sinne der Diagnose und Prophylaxe auch dann vertretbar, wenn neben zerstörungsfreien Verfahren in geringem Umfang zusätzlich zerstörende Prüfungen durchgeführt werden. Die anfallenden Materialproben bei Probefreilegungen können zu mikrochemischen (Bindemittel, Salz) sowie mikrobiologischen Untersuchungen verwendet werden. Aus den Ergebnissen lassen sich fundierte Prognosen zur Beständigkeit, zur Überwachung und zum voraussichtlichen Pflegebedarf dieser Objekte ableiten.

4 Feuchtechnische Untersuchungen an Prüfkörpern

In diesem Abschnitt wird die Untersuchung der substratabhängigen feuchtetechnischen Entwicklung von Mehrfachbeschichtungen auf unterschiedlichen Kalkputzen vorgestellt.

4.1 Einleitung

Die feuchtetechnischen Eigenschaften von Beschichtungen können substratabhängig stark schwanken (HERM 1991, HERM & WARSCHEID 1993, STADLBAUER & BRANDES 1994, BRANDES 1995). Wenig bekannt ist hingegen die Wirksamkeit von Anstrichen auf historischem Putz und ähnlichen Untergründen, vor allem in Hinblick auf alte, häufig auf Kalk basierenden Rezepturen. Erste Ansätze finden sich in der Veröffentlichung von HERM & WAHRSCHEID 1993. An dieser Stelle sollte auf das EUROCARE-Projekt EU-791 ”EUROLIME” hingewiesen werden, das sich vorwiegend mit den Fragen des Umgangs und der Herstellung des Baumaterials Kalk, aber auch der Anwendung im Bereich der Denkmalpflege beschäftigt. TRAMPEDACH 1993 weist innerhalb dieses Projektes explizit auf die Vorteile der in Dänemark und Schweden bereits seit langer Zeit erfolgreich praktizierten Verwendung von Kalk bei Restaurierungsmaßnahmen hin.
Im Kapitel 3.2 wird das feuchtetechnische Verhalten freigelegter auf Kalk basierender Beschichtungsfolgen im Bereich historischer Wandmalerei beschrieben. Die stark abweichende Entwicklung der einzelnen Anstriche innerhalb des komplexen Schichtverbandes verlangt nach einer detaillierten feuchtetechnischen Betrachtung einfacher Systeme. In dem folgenden Teil der Arbeit werden hierzu Experimente an fünf historisch rezeptierten Beschichtungssystemen auf sechs unterschiedlichen Kalkmörtelvarianten unter kontrollierten Laborbedingungen vorgestellt.
Durch die Variation von B/Z-Verhältnis, W/B- Wert und Zuschlagsgröße lassen sich unterschiedliche Mörteleigenschaften erzielen (WISSER 1989, SCHÄFER & HILSDORF 1993, VAN BALEN 1991, HOFFMANN & NIESEL 1993, VAN BALEN & VAN GEMERT 1993, BÖTTGER & KNÖFEL 1994, BÖTTGER & KNÖFEL 1996, BÖTTGER 1997, GÖDICKE-DETTMERING 1997). Ebenso beeinflussen die Carbonatisierungs- und Lagerungsbedingungen die Entwicklung des Porenraumes eines Kalkmörtels (HOFFMANN & ROOß 1994, KNÖFEL & WINNEFELD 1995, BÖTTGER & KNÖFEL 1996, HERM 1997). Da das Substrat einen großen Einfluss

auf die Eigenschaften einer Beschichtung haben kann, wurden die als Trägermaterial vorgesehenen Kalkputze im Vorfeld der Beschichtung insbesondere hinsichtlich ihrer Porenraumentwicklung, den bauphysikalischen und den feuchtetechnischen Merkmalen genau untersucht.
Durch die Wahl der Beschichtungssysteme soll ein möglichst großes Wirkungsspektrum erreicht werden. Die einzelnen Rezepturen auf der Basis von drei unterschiedlichen Bindemittelkombinationen sind in Anlehnung an historische Befunde und der Empfehlung von Restauratoren entwickelt worden. Ein reines Kalksystem und eine maximal dosierte Leinölemulsion sowie ein System mit den höchsten ausführbaren Kalk-Kaseingehalten bilden hierbei die drei Eckpfeiler. Nach der Art der Verarbeitbarkeit und der optischen Begutachtung nach dem Trocknen unterschiedlicher Anstriche (makroskopisch und mikroskopisch auf Rissbildung, Craquelee, Sinterhautbildung etc.) wurden insgesamt fünf Rezepturen ausgewählt. Die Beschichtungen wurden ausschließlich im Verbundsystem mit dem Trägermaterial den feuchtetechnischen Prüfungen (Wasserdampf-Durchlässigkeit, kapillare Wasseraufnahme und Trocknungsgeschwindigkeit) unterzogen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den physikalischen Eigenschaftsveränderungen des Verbundsystems mit wachsender Beschichtungsanzahl in Abhängigkeit vom Trägermaterial.

4.2 Anfertigung und Untersuchung der Prüfkörper

4.2.1 Kalkputz als Substratmaterial

Die Zusammensetzung der Mörtelpräparate wurden in erster Linie nach folgenden Gesichtspunkten entwickelt:

- Variable Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse und Sieblinien in der Streubreite der historischen Mörtelrezepturen der Kirchen in Campen und Eilsum (Ostfriesland; s. Anhang);
- Teilweise unter Berücksichtigung der Daten von SCHÄFER & HILSDORF 1993 hinsichtlich des Wasser/Bindemittel-Verhältnisses der Frischmörtel und der daraus resultierenden Eigenschaften der Festmörtel;
- Erhalten einer möglichst großen Variationsbreite in kellengerechter Verarbeitbarkeit.

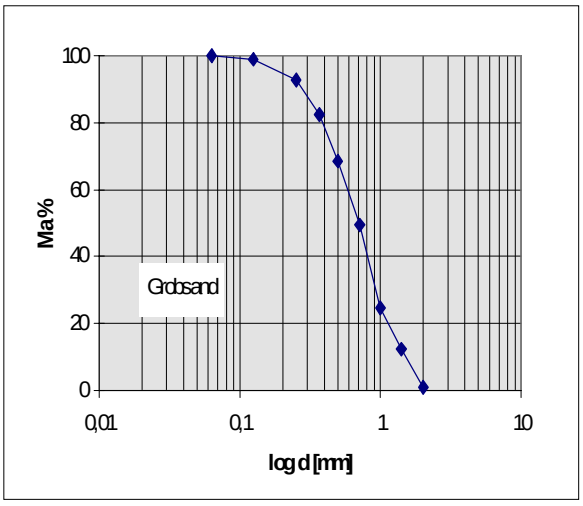
4.2.1.1 Zusammensetzung des Ausgangsmaterials

Bindemittel:
Weißkalkhydrat (Blütenweiß), Fels-Werke GmbH - (Wkh),
Sumpfkalkteig Fa. Szeppek - (Skh)
Sumpfkalk und Weißkalkhydrat sind gelöschte Kalke und gehören gemäß DIN 1060-1: 1995-03 zur Gruppe der sogenannten Luftkalke, die ausschließlich unter der Reaktion mit CO_2 der Luft erhärten/carbonatisieren.

Zuschlag:
Quarzsand, G23 (feine Körnung), G40 (mittlere Körnung), G50 (grobe Körnung), in zwei in Abbildung 43 dargestellten Sieblinien .

Entionisiertes Wasser.

Grobe Körnung: (PI, PIII, PV, PVII):



Feine Körnung (PII, PIV, PVI, PVIII):

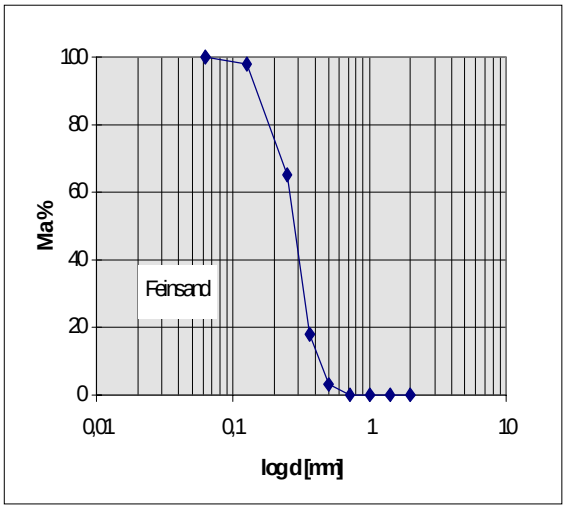


Abb. 43: Sieblinien des verwendeten Zuschlags (Summendurchgang).

Die Zusammensetzung der ausgewählten Putzrezepturen läßt sich Tabelle 9 entnehmen.

Tabelle 9: Zusammensetzung der Putzvarianten:

	Bindemittel	B/Z-Verhältnis (frisch)	W/B-Wert: (frisch)	Zuschlag (Sieblinie)
PI	Wkh	1:2	0,75	grob
PII	Wkh	1:2	0,75	fein
PIII	Wkh	1:5	1,0	grob
PIV	Wkh	1:5	1,0	fein
PV *[1]	Skh	1:2	1,56	grob
PVI *[1]	Skh	1:2	1,56	fein
PVII	Skh	1:5	1,56	grob
PVIII	Skh	1:5	1,56	fein

*[1] Putz V und VI sind gerissen, da der Bindemittel- und Wasseranteil in Bezug auf die Zuschlagsmenge zu hoch waren und wurden deshalb nicht weiter verwendet.

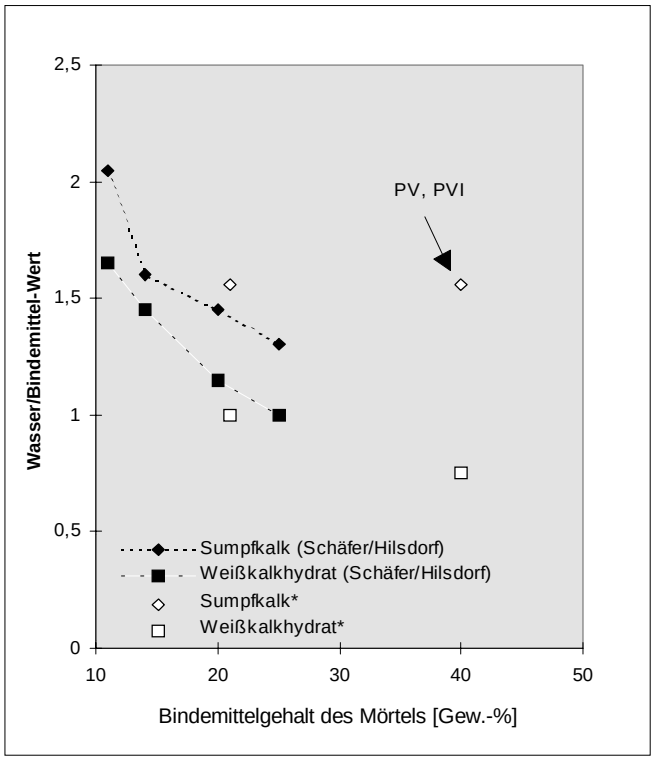


Abb. 44: Für die Verarbeitbarkeit ideale Wasser/Bindemittelwerte in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt (nach Schäfer & Hilsdorf 1993). Die nicht ausgefüllten Symbole verdeutlichen die Lage der in dieser Arbeit entwickelten Kalkputzrezepturen. Die problematischen (gerissenen) Mörtel aus Sumpfkalk PV und PVI liegen mit einen Wasser/Bindemittelwert von 1.56 deutlich über dem sich abzeichnenden Bereich von Sumpfkalk nach Schäfer & Hilsdorf 1993.

Für einen kellengerechten Frischmörtel steigt mit sinkendem Bindemittelgehalt der erforderliche Wasser/Bindemittelwert, wobei der jeweilige Wasseranspruch von der Teilchengröße des Bindemittels abhängt. Je feiner die Teilchengrößenverteilung

des Bindemittels, desto höher ist der Wasseranspruch des Frischmörtels. In carbonatisiertem Zustand weisen die Putze mit dem B/Z-Verhältnis von 1:2 einen Bindemittelgehalt von 40 Gew.-% auf und die Putze mit dem B/Z-Verhältnis 1:5 einen Bindemittelgehalt von 21 Gew.-% auf.
Nach der in SCHÄFER & HILSDORF 1993 dargestellten Abhängigkeit des Wasser/Bindemittelwertes vom Bindemittelgehalt des Mörtels war bereits zu vermuten, daß PV und PVI reißen, da durch den natürlichen Wassergehalt des Sumpfkalks der Wasser/Bindemittelwert mit 1,56 zu hoch für das B/Z-Verhältnis von 1:2 der Putze liegt. Werden die von Schäfer und Hilsdorf ermittelten Werte in Abbildung 44 zu höheren Bindemittelgehalten extrapoliert, so würde sich bei diesem B/Z-Verhältnis ein Wasser/Bindemittelwert von ca. 1 ergeben. Der Wassergehalt des Sumpfkalks wurde durch Trocknung bei 105°C ermittelt. Der reine Bindemittelgehalt liegt bei 38,5Gew%.

4.2.1.2 Prüfkörperherstellung und Carbonatisierungsbedingungen

Das Mischen des Mörtels erfolgte in in Anlehnung an DIN/EN 196 T1 in einem dort geforderten Mischer (Fa. Hobart):

- Weißkalkhydrat
  Ein Großteil der berechneten Wassermenge wird in den Mischtrog geschüttet. Das Bindemittel wird unter langsamer Umdrehungsgeschwindigkeit zugegeben und mit dem restlichen Wasser versehen. Nach 30 s wird der vorher im gewünschten Körnungsspektrum gemischte Sand gleichmäßig hinzugefügt und mit höherer Geschwindigkeit gut vermengt.

- Sumpfkalk
  Die Zugabe von Wasser entfällt. Der Sumpfkalkteig wird unter geringer Geschwindigkeit 30 s lang homogenisiert. Nach der langsamen Zugabe des Sandes erfolgt das Mischen des Mörtels bei höherer Geschwindigkeit.

Um eine Vielzahl von Probekörpern produzieren zu können, wurde auf die übliche Verschalung in genormten Stahlformen verzichtet.
Die Entwicklung des nachfolgend beschriebenen Verfahrens ermöglicht die Herstellung von 56 Prüfkörpern mit den Maßen 7 x 6 x 1 cm mit einer Trogfüllung (6 kg Mörtelmasse):

Ein 1cm hoher Rahmen aus Holzleisten wird auf einer mit Stoff (Baumwollnessel) bespannten Resopalplatte (1 m x 1 m) befestigt. Die Verwendung des saugfähigen Stoffes soll den Abtransport überflüssigen Wassers ermöglichen. Vor dem Auftragen des Mörtels muß der Baumwollnessel mit entionisiertem Wasser befeuchtet werden. Danach wird der frisch angemachte Mörtel mit der Kelle aufgebracht, von der Mitte her unter Druck gleichmäßig innerhalb des Rahmens verstrichen und über den Rand des Holzrahmens mit einer langen Metallatte abgezogen. Auf diese Weise wird eine gleichmäßige Höhe des Mörtelkuchens erreicht.
Auf eine weitere Verdichtung (Rüttler, Vibrationstisch) wurde bewußt verzichtet, da durch diese Behandlung das Antragen eines Putzes auf einer Wandfläche nachgestellt werden sollte.
Die Probeplatten wurden insgesamt 7 Tage bei 20°C und 95 % relativer Luftfeuchte gelagert. Je nach Festigkeit der unterschiedichen Mörtelvarianten konnte der Rahmen nach 2 bzw. 7 Tagen abgenommen werden und der Mörtelkuchen in 56 7 cm x 6 cm große Prüfkörper geschnitten werden (Abbildung 45), die liegend auf Stabhölzen (Rundumversorgung mit Luft gewährleistet), weitere 28 Tage bei 20°C/65% rel. Luftfeuchtigkeit gelagert wurden.

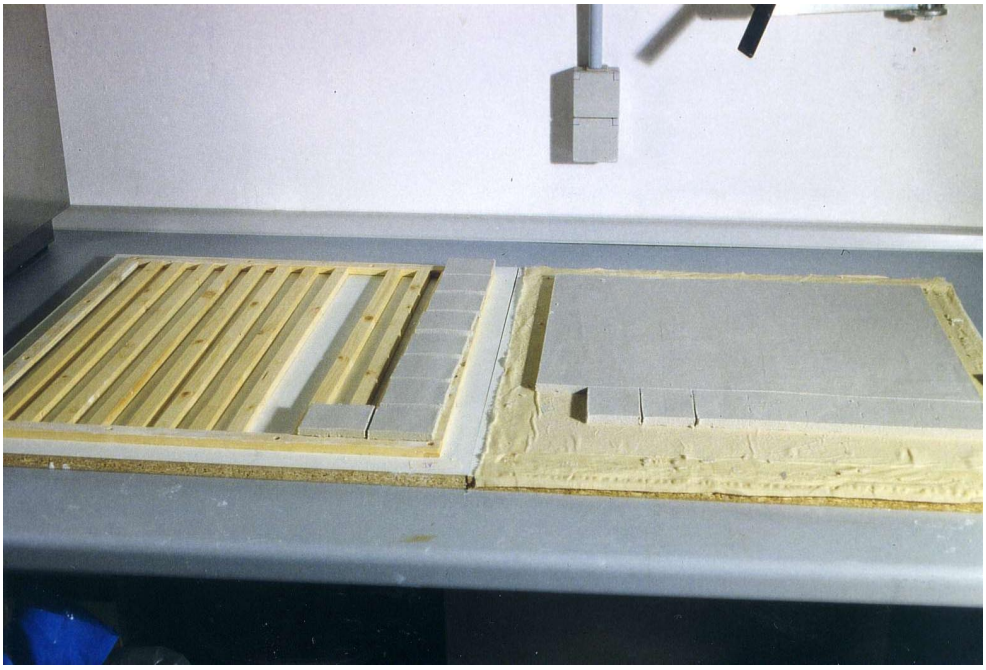


Abb. 45: Aus einer Platte geschnittene Mörtelproben. Die Mörtelvariantern PV und PVI sind gerissen, da Bindemittel- und Wasseranteile in Bezug auf die Zuschlagsmenge zu hoch sind. Sie wurden deshalb nicht weiter verwendet.

Carbonatisierungsbedingungen:

Die Frischmörtelproben wurden unterschiedlichen Carbonatisierungsbedingungen ausgesetzt, um die höchste Carbonatisierungrate unter den dem Labor zur Verfügung stehenden Möglichkeiten festzustellen.

a. Lagerung mit anfänglicher CO_2 -Behandlung:
   Die in einer weitgehend abgeschlosssenen Kammer befindlichen Mörtelproben wurden über einen Zeitraum von 28 Tagen fünf Tage die Woche 2 x pro Tag mit 5 Vol.-% CO_2 versetzt und 1 x pro Woche für 5 min in $H_2O_{entmin.}$ getaucht. Dieser Behandlung folgte die Lagerung in Raumklima und jeden zweiten Tag eine gründliche Befeuchtung durch Besprühen mit Wasser.

b. Prüfkörper aus dem Wasserdampfdiffusions-Dauerversuch:
   Die Mörtelproben wurden in Anlehnung an DIN 52 617 in Raumklima bei 100% H_2O gelagert. Das Außenklima umfaßt Schwankungen von 45% - 60% rel. Luftfeuchtigkeit und 20° - 23°C.

c. Lagerung in Raumklima (45% - 60% rel. Luftfeuchtigkeit), befeuchtet:
   Die Mörtelproben wurden jeden zweiten Tag gründlich mit H_2O_{entmin}. besprüht.

d. Lagerung in Raumklima.
   Die Mörtelproben wurden ausschließlich im Raumklima bei 45% - 60% rel. Luftfeuchtigkeit gelagert und keiner weiteren Behandlung unterzogen.

4.2.1.3 Carbonatisierungsrate in Abhängigkeit von der Konditionierung der Mörtel

Die höchste Carbonatisierungsrate zeigen die Proben, die einer anfänglichen CO_2 -Behandlung unterzogen wurden (Tab. 9a). Bis auf PI und PII, die höhere Bindemittelanteile aufweisen (B/Z = 1:2) sind nach 114 Tagen alle weiteren Mörtelvarianten (B/Z = 1:5) carbonatisiert. Die Proben aus den Versuchen der Wasserdampf-Durchlässigkeit (Tab. 9b) und der Laborlagerung mit regelmäßiger Befeuchtung (Tab. 9c) lassen keine einheitliche Tendenz erkennen. Auffällig ist jedoch, daß PII im Wasserdampf-Durchlässigkeitsversuch bis zum Schluß fast keine Carbonatisierungs-Reaktion zeigt. Die Befeuchtung der Proben der Lagerung in Laborklima scheint sich bei PI, PII, und PIV weniger günstig auszuwirken als bei den restlichen Proben. PI, PII, und PIV weisen unbehandelt (Lagerung in Laborklima) höhere Carbonatisierungsraten auf als nach zyklischem Besprühen mit Wasser.

Tabelle 9 a - d: Carbonatisierungsrate der Mörtelvarianten in Abhängigkeit von der Konditionierung:

Tab. 9 a. mit anfänglicher CO_2 -Behandlung:

Putz:	**28d**	**65d**	**114d**
I	10%	25%	65%
II	10%	30%	85%
III	100%	100%	100%
IV	2%	98%	100%
VII	40%	98%	100%
VIII	97%	95%	100%

Tab. 9 b: Wasserdampfdiffusions-Dauerversuch

Putz:	**97d**	**134d**	**183d**
I	50%	55%	70%
II	0%	0%	10%
III	50%	90%	100%
IV	65%	90%	100%
VII	75%	96%	100%
VIII	80%	92%	100%

Tab. 9 c: Raumklima, tägl. m. H_2O besprüht: Tab. 9 d: Raumklima unbehandelt:

Putz:	**112d**	**142d**	**191d**	**191d**
I	15%	25%	60%	80%
IV	50%	60%	90%	98%
Putz:	**113d**	**143d**	**192d**	**192d**
II	40%	50%	80%	90%
III	95%	98%	100%	95%
Putz:	**106d**	**136d**	**185d**	**185d**
VII	90%	100%	100%	90%
VIII	95%	100%	100%	98%

Tab. 10: Materialfeuchten der Proben zur Zeit der Feststellung der Carbonatisierungsrate.

Lagerung:	**a.**		**b.**		**c.**	
	C.-rate	M.-feuchte *	C.-rate	M.-feuchte*	C.-rate	M.-feuchte*
I	10%	14,8%	50%	0,6%	15%	0,6%
II	10%	15,7%	0%	2,5%	40%	0,4%
III	100%	3,3%	50%	0,4%	95%	**0,3%**
IV	2%	9,9%	65%	0,4%	50%	0,8%
VII	30%	6,3%	75%	0,3%	90%	**0,3%**
VIII	97%	3,8%	80%	0,4%	95%	**0,3%**

*Materialfeuchte bestimmt durch Trocknung bei 105°C

Parallel zur Bestimmung der Cabonatisierungsrate wurde an den ersten Stichproben aller Lagerungsarten die zur Zeit der Entnahme vorliegende Materialfeuchte (Tab. 10). bestimmt.

Nach NEY 1967 verläuft die carbonatische Erhärtung bei Materialfeuchten von 0,8%-4%. Andere Autoren sprechen von 0,7% (WÜRZNER 1919) bzw. 0,5-1% (HENKEL 1955). Eine 100%ige Porenfüllung mit Wassser behindert eine schnelle Carbonatisierung. Die günstigsten Vorraussetzungen für eine schnelle Carbonatisierung liegen nach HOFFMANN & ROSS 1994 bei 65-75 % rel. Luftfeuchte.

In den hier vorgestellten Versuchen scheinen zwei in Tabelle 10 hervorgehobene, die Carbonatisierung begünstigende Feuchtigkeitsgehalte zu existieren:

1. Bei den Proben a. (Lagerung mit anfänglicher CO_2 -Behandlung) liegen sie bei 3,3%, bzw. 3,8% Materialfeuchte.
2. Bei den Proben c. (Laborklima ohne Behandlung) liegen sie bei ca. 0,3% Materialfeuchte.

Die Proben aus dem Wasserdampfdiffusions-Dauerversuch lassen keine konkrete Aussage zu; ein höherer Feuchtegehalt scheint jedoch die Carbonatisierung zu hemmen. Es ist anzunehmen, daß sowohl die Konzentration an CO_2 der umgebenden Atmosphäre als auch die anfängliche Ausbildung des Porenraumes (Porenvolumenverteilung) der Kalkputze unterschiedliche ideale Materialfeuchten bedingen und insofern kein allgemein gültiger Wert genannt werden kann.
Während der CO_2 -Behandlung entstehen durch die spontane Carbonatisierungsreaktion große Mengen H_2O. In diesem Moment sind vermutlich die Kapillarporen größtenteils wassergesättigt. Da der Diffusionskoeffizient von CO_2 in Wasser um 10^4 - bis 10^5 -fach geringer ist als in Luft (RICHARDSON 1988), verläuft die weitere Carbonatisierung deutlich langsamer. Die Putze mit den höchsten Bindemittelgehalten (PI und PII) und den größten Kapillarporen- und Gesamtporenanteilen weisen bei der Lagerung unter anfänglicher CO_2 -Atmosphäre die geringsten Carbonatisierungsraten auf sowie eine insgesamt unvollständige Carbonatisierung zur Zeit der letzten Untersuchung. Die hohen Materialfeuchten dieser Proben (15%-16%) werden durch Kapillarkondensationserscheinungen hervorgerufen (vergl. Abbildung 48, Anteile von Poren mit Kapillarkondensationserscheinungen). Sie liegen bei der Lagerung unter CO_2 -Atmosphäre nur 2% unter der maximalen kapillaren atmosphärischen Wasseraufnahme in carbonatisiertem Zustand.

4.2.1.4 Veränderung der Wasserdampf-Durchlässigkeit während der Carbonatisierung

Die mit der Carbonatisierung verbundene Volumenzunahme geht mit einer Veränderung des Porenraumes einher. Nach VAN BALEN 1991 sind vor allem die Poren mit einem kleinen Durchmesser davon betroffen. Sie werden zunehmend durch die Kristallisation von Calciumcarbonat verdichtet. Obwohl hauptsächlich gröbere Poren den Diffusionswiderstand eines Materials bestimmen, läßt sich die Veränderung des Porenraumes anhand von Wasserdampf-Diffusions-

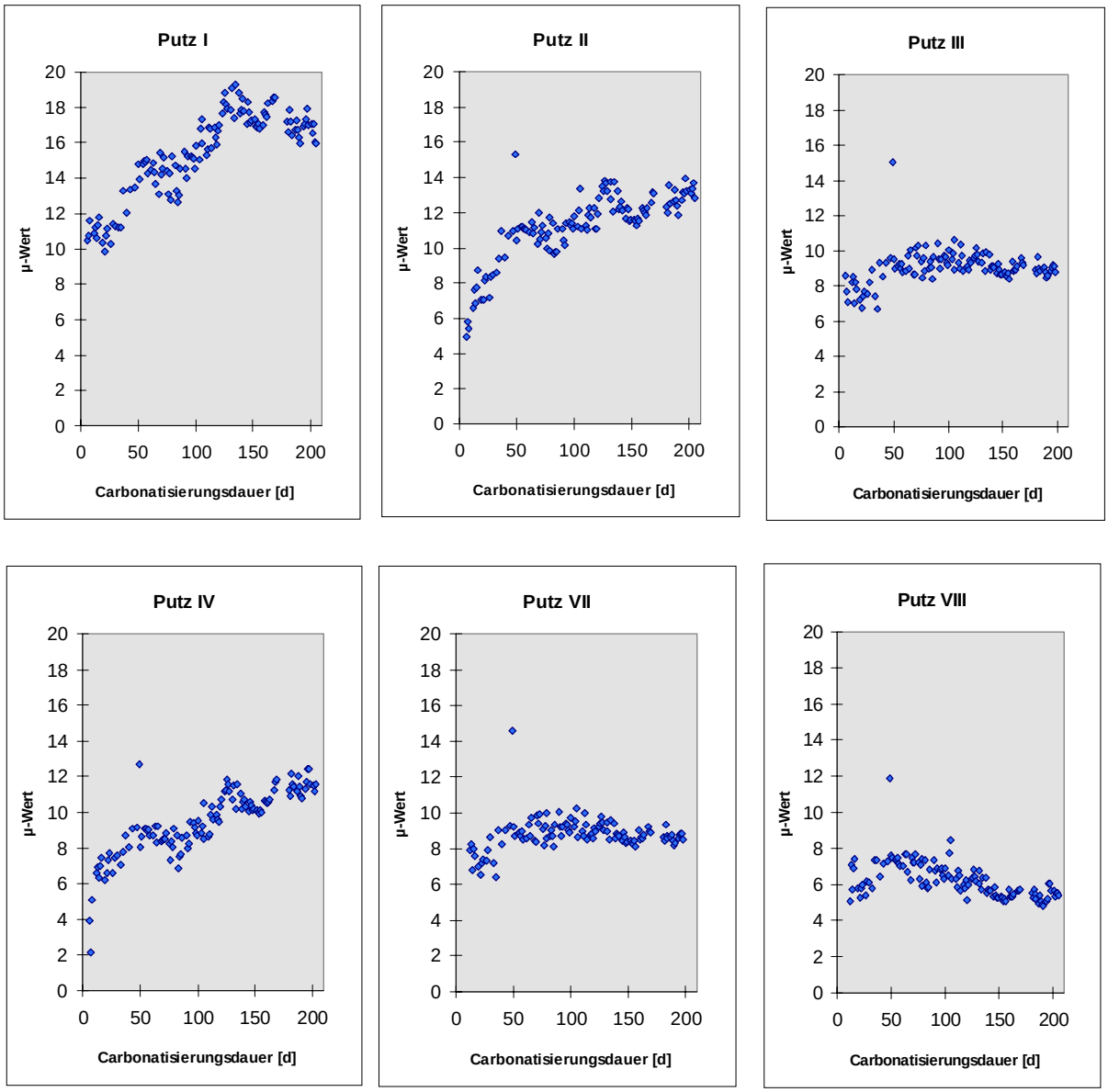


Abb. 46: Veränderung des Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen der sechs verwendeten Mörtel während der Cabonatisierungsdauer.

dauerversuchen in Abbildung 46 beobachten:

Bereits während der Carbonatisierungsphase zeigen die verschiedenen Putze deutliche Unterschiede hinsichtlich der Wasserdampfdiffusion, sowohl im zeitlichen Verlauf (Beobachtungszeitraum 200 Tage), als auch in Bezug auf die erzielten Endwerte.

Die Carbonatisierung der Sumpfkalk-Mörtel (P VII und VIII) sowie des Weißkalkhydrat-Mörtels PIII verläuft schneller als die der restlichen Weißkalkhydrat-Mörtel. Die Sumpfkalkmörtel erreichen nach einem stetigen Anstieg des µ-Werts ihren maximalen Wasserdampf- Diffusionswiderstand bereits nach etwa 50 bzw. 75

Tagen (Abbildung 46). Stichproben mit Phenolphtalein belegen zu diesem Zeitpunkt bereits eine vollständige Carbonatisierung. Nach vollständiger Carbonatisierung ist wieder ein leichtes Sinken des µ-Wertes zu verzeichnen. Demgegenüber ist die Carbonatisierung der Mörtelrezepturen I und II selbst nach 200 Tagen noch nicht ganz abgeschlossen Dies äußert sich durch einen weiterhin steilen bis stagnierenden Kurvenverlauf bei µ-Werten bis zu 14 -18 (nach etwa 210 Tagen). Bei Mörtel I und II wird das Verhalten in erster Linie auf das höhere B/Z-Verhältnis und die damit verbundenen höheren Anteile an Poren mit Kondensationserscheinungen zurückgeführt. Je höher der Anteil dieser Poren, desto stärker wird die CO_2-Aufnahme durch wassergesättigte Poren blockiert (VAN BALEN 1991). Der Grund für das Verhalten des Mörtels IV ist nicht geklärt. Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand steigt stetig an, obwohl die Stichprobe nach 134 Tagen zu 90% und bei Beendigung des Versuches nach dem Phenolphtalein-Test zu 100% carbonatisiert war. BÖTTGER & KNÖFEL 1996 weisen darauf hin, daß sie trotz eines negativem Phenolphtalein-Tests mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops bereits eine unvollständige Carbonatisierung feststellen konnten. Möglicherweise trifft dies auch auf die Probe IV zu.

4.2.1.5 Porosität und mechanische Eigenschaften

In Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr. Knöfel am Institut für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-GH Siegen wurde mittels Hg-Druckporosimetrie (Gerät: Micromeritics Autopore II 9220) die Porosität und die Porenradienverteilung der Mörtel bestimmt. Hierzu wurden ausschließlich Proben verwendet, die ohne weitere Behandlung unter Laboratmosphäre carbonatisiert waren (Lagerungsart d). Das Material wurde zerkleinert, auf eine Körnung von 2-4 mm ausgesiebt und bei 70°C getrocknet.

Weiterhin wurden der dynamische E-Modul und die Druckfestigkeit untersucht. Die detaillierte Porenvolumenverteilung der sechs Putzträger ist in Abbildung 47 dargestellt. Die zur Charakterisierung von hydraulischen Kalken weit verbreitete Poreneinteilung nach ROMBERG 1978 in Luft- und Kapillar- und Gelporenbereiche wird nach SETZER 1986 in vier detailliertere Kapillarporenfraktionen unterteilt (Abbildung 47). Zur Diskussion der Ausbildung des Porenraumes (anhand Abbildung 48) und der feuchtetechnischen Entwicklung von Verbundsystemen Kalkputz/Beschichtung (in Abschnitt 4.2) findet hier die für Kalkmörtel anschaulichere Einteilung nach SETZER 1986 Anwendung.

BÖTTGER 1994 unterteilt die Porenradienverteilung in 6 Bereiche:

Bereich 1:	Poren	>50µm
Bereich 2:	Poren von	50-10µm
Bereich 3:	Poren von	10-1µm
Bereich 4:	Poren von	1-0,1µm
Bereich 5:	Poren von	0,1-0,01µm
Bereich 6:	Poren	<0,01µm.

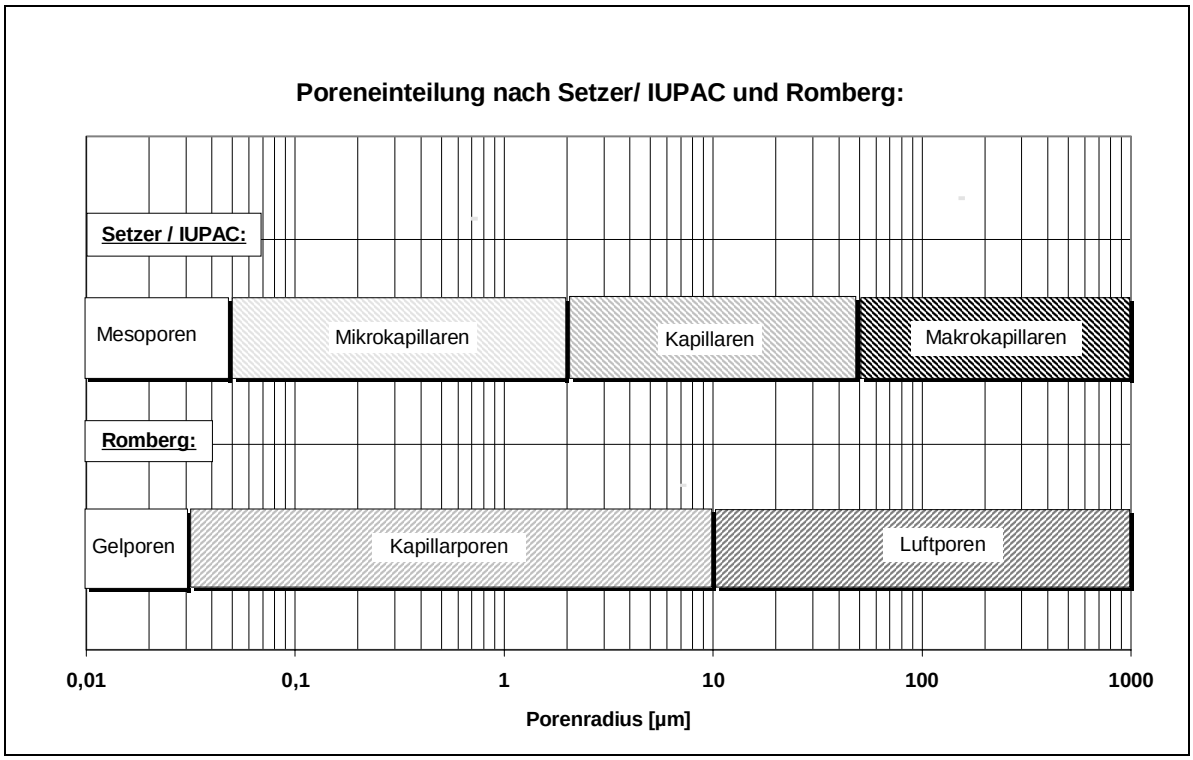


Abb. 47: Unterschiedliche Poreneinteilung nach Setzer (1986) und Romberg (1978).

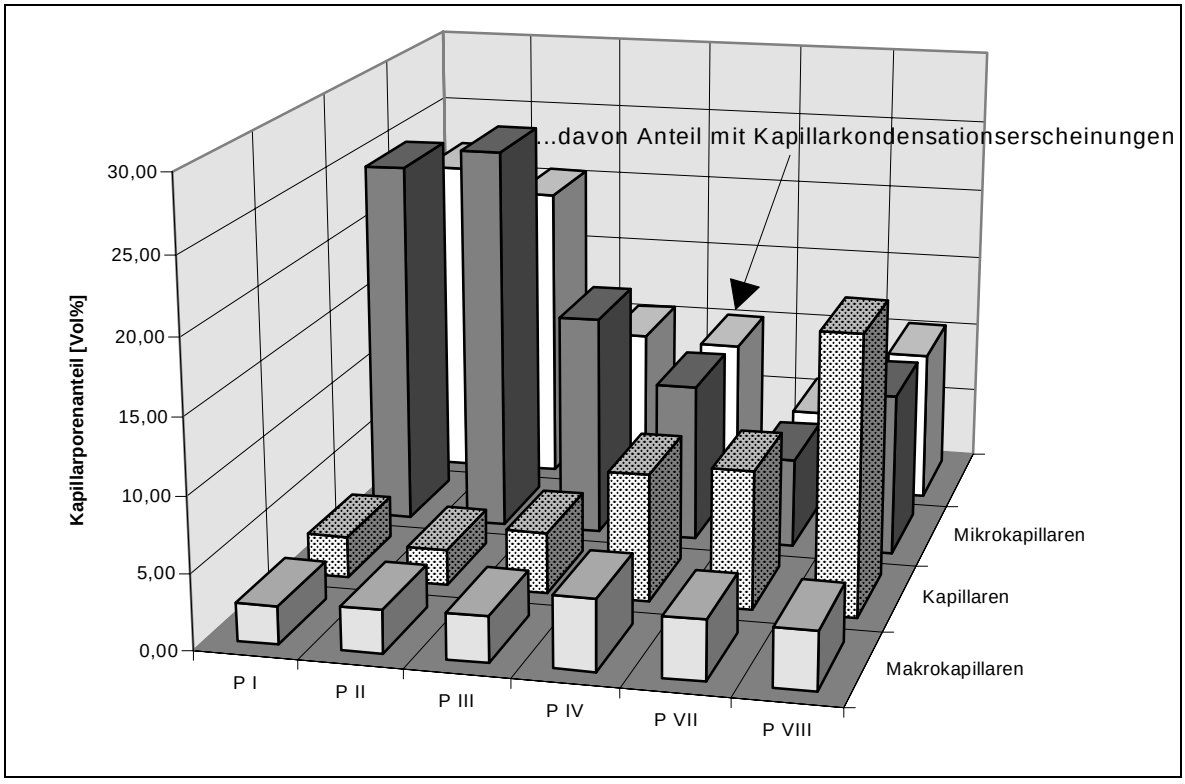


Abb. 48: Die über Hg-Druckporosimetrie bestimmte Porenradienverteilung der als Trägermaterial verwendeten Kalkmörtel (Einteilung nach Setzer 1986).

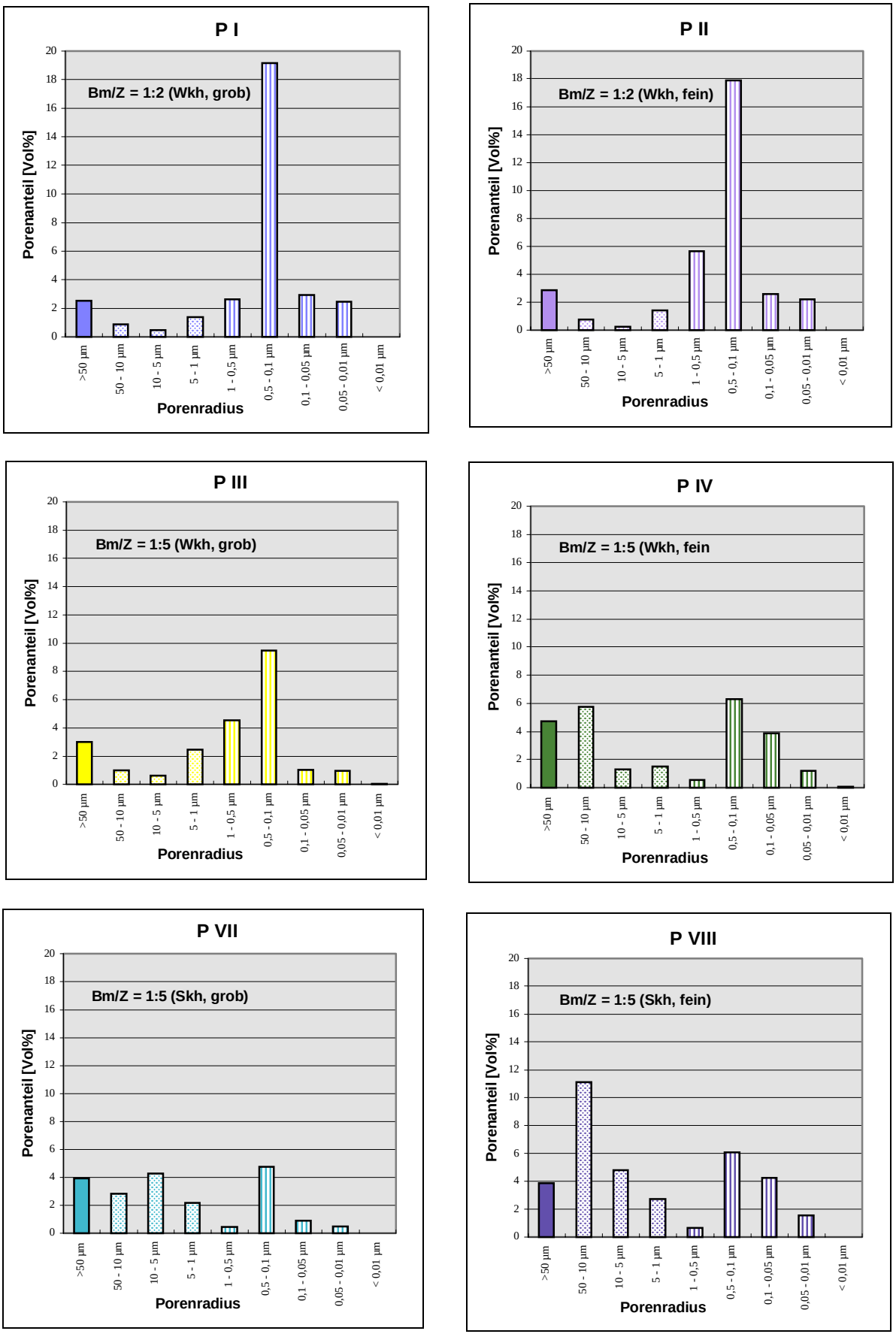


Abb. 49: Porenvolumenverteilung der entwickelten Kalkmörtel.

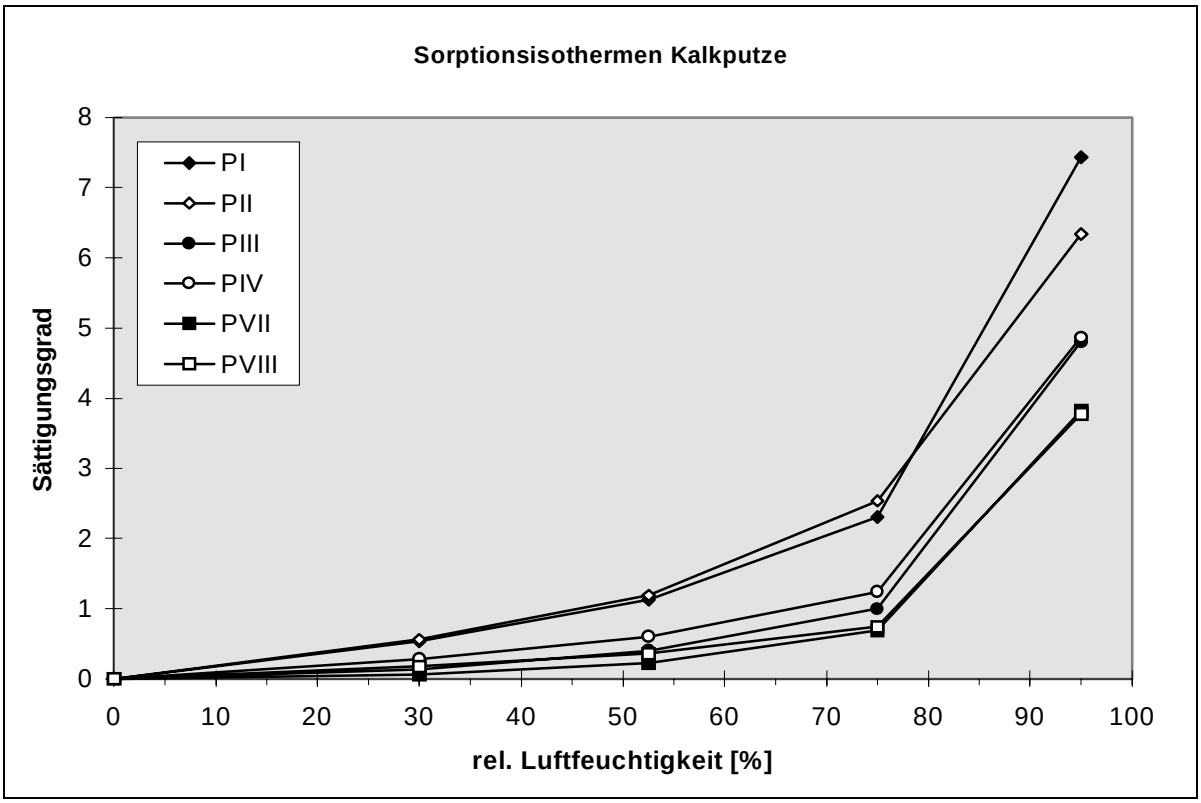


Abb. 50: Die Sorptionsisothermen der einzelnen Putzvarianten zeigen, daß PI und PII einen, auf die höheren Mikroporenanteile zurückzuführenden, steileren Anstieg mit zunehmender Luftfeuchtigkeit aufweisen als die restlichen Putze.

Die Auswahl der Putzrezepturen zeigt ein gelungenes Spektrum an feuchtetechnisch unterschiedlich wirksamen Porenfraktionen (Makrokapillaren bis Mesoporen, Abbildung 49). Ebenso unterscheiden sich die Mörtel in den mechanischen Eigenschaften, die in Tabelle 11 dargestellt sind.

- Die Rezepturen I und II (Weißkalkhydrat) weisen größtenteils Mikrokapillaren auf. Infolge dessen steigen im Sorptionsversuch die Isothermen (Abbildung 50) bei höheren Luftfeuchtigkeiten, bedingt durch Kapillarkondensationsvorgänge steiler an, als bei den restlichen Putzen. Kapillaren und Makrokapillaren sind nur in geringen Anteilen vorhanden und verursachen einen vergleichsweise höheren Wasserdampf-Diffusionswiderstand, wie in Abbildung 46 zu erkennen ist.
- Die Rezepturen PIII, PIV, PVII und PVIII weisen höhere Kapillar- und Makrokapillarporen-Anteile und sinkende Mikrokapillarporen-Anteile auf. Dementsprechend ist der Wasserdampf-Diffusionswiderstand geringer als bei PI und PII (Abbildung 46). Ebenso verlaufen die Sorptionsisothermen flacher (Abbildung 50).
- PVIII und PVII (Sumpfkalk) sowie PIII und PIV (Weißkalkhydrat) weisen trotz ähnlicher Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse deutlich unterschiedliche Porenradienverteilungen auf. Die Sumpfkalk-Rezepturen zeigen höhere Kapillar- und

Makrokapillarporenanteile als die entsprechenden Weißkalkhydrat-Rezepturen. Diese Entwicklung kann auf den leicht erhöhten Wassergehalt (höherer W/B-Wert) der Sumpfkalk-Frischmörtel zurückgeführt werden (siehe Tabelle 9; Abbildung 44).

Vergleichende halbquantitative Röntgenuntersuchungen (Sumpfkalk bei 40°C getrocknet) zeigen, daß das Verhältnis von reaktionsfähigem Portlandit [$Ca(OH)_2$] zu Calcit [$CaCO_3$] in dem verwendeten Sumpfkalk in der Regel größer ist, als in dem verwendeten Weißkalkhydrat (Anhang). HERM 1997 bestätigt Literaturangaben, die Sumpfkalk im Vergleich zu Weißkalkhydrat eine größere spezifische Oberfläche zuschreiben.

Tabelle 11: Mechanische Eigenschaften und Porosität nach 440 Tagen Laborlagerung:

Probe	Festmörtelrohdichte* [g/cm^3]	E-Modul [N/mm^2]	Druckfestigkeit [N/mm^2]	Gesamt-Porosität [Vol.-%]	mittlerer Porenradius [µm]
P I	1,69	7800	4,23	32,43	0,33
P II	1,64	6400	4,69	33,56	0,39
P III	1,67	6500	1,33	23,13	0,50
P IV	1,77	4000	1,00	25,26	2,28
P VII	1,66	4300	0,98	19,52[1]	6,14
P VIII	1,84	4000	1,69	34,86	8,19

*Die Festmörtelrohdichte wird aus Volumen und Gewicht der Probe berechnet
[1] vermutlich Messfehler

Die deutlich größeren Druckfestigkeiten der Mörtel PI und PII ergeben sich aus dem höheren Bindemittelgehalt (B/Z-Verhältnis 1:2) im Vergleich zu den restlichen Putzproben (B/Z-Verhältnis 1:5). Damit einher geht ein höherer E-Modul. PIII zeigt aufgrund des höheren Zuschlaganteils (grobe Körnung) einen ähnlich hohen E-Modul wie PII. Mit der Zeit ist insgesamt eine Zunahme dieser Eigenschaften zu erwarten.
Durch eine regelmäßige Zuführung von Feuchtigkeit werden während der Carbonatisierung Umkristallisationsprozesse ermöglicht, die eine Verdichtung des Gefüges bedingen. KNÖFEL & WINNEFELD 1995 erreichen in ihren Versuchen

mit Weiß- und Wasserkalkhydrat bei feuchten Lagerungsbedingungen (20 °C/80% rel. Luftfeuchtigkeit) unter CO_2-Zugabe eine Veränderung der technologischen Eigenschaften, die sich im Gegensatz zu unter Normklima gelagerten Proben durch eine Festigkeitssteigerung sowie eine deutliche Reduzierung des Wasseraufnahmekoeffizienten äußert. Die Proben der Lagerungsart a, die mit anfängicher CO_2-Zugabe ebenfalls bei feuchteren Bedingungen carbonatisieren konnten, wurden zwar keiner baustoffphysikalischen Prüfung in der vorher genannten Weise unterzogen, zeigen jedoch analog zu den Untersuchungen von KNÖFEL & WINNEFELD 1995 undurchlässigere Eigenschaften (siehe folgendes Kapitel). Dies gilt auch für Proben der Serie b und c, die jedoch in keinen weiteren Untersuchungen Verwendung fanden.

4.2.1.6 Wasserdampf-Durchlässigkeit

Die Werte der Wasserdampf-Durchlässigkeit der Kalkmörtel nach vollständiger Carbonatisierung sind in Tabelle 12 dargestellt. Putz I und Putz II (B/Z-Verhältnis 1:2) weisen den höchsten Wasserdampf-Diffusionswiderstand auf. Die Putze mit einem B/Z-Verhältnis von 1:5 sind diffusionsoffener, wobei die Sumpfkalk-Rezepturen PVII und PVIII im Vergleich zu den entsprechenden Weißkalkhydrat-Rezepturen P III und PIV einen noch geringeren µ-Wert zeigen. Die Werte gehen tendentiell mit den durchschnittlichen Porenradien der jeweiligen Putzvarianten (Tab. 11) konform. Je größer der mittlere Porenradius und die Gesamtporosität der Probe ist, desto geringer ist auch der Wasserdampf-Diffusionswiderstand.

Tabelle 12: µ-Werte der Mörtel nach vollständiger Carbonatisierung

Putz I	Putz II	Putz III	Putz IV	Putz VII	Putz VIII
19	16	12	12	-	8

4.2.1.7 Kapillare Wasseraufnahme

Die durchschnittlichen Werte der kapillaren Wasseraufnahme (nach 1 Minute) zeigen eine in Tabelle 13 ersichtliche Abhängigkeit von den Carbonatisierungsbedingungen der Mörtel. Die Proben, die während der Carbonatisierung regelmäßig befeuchtet wurden (Lagerung a) und daher Umkristallisationsprozesse ermöglicht wurden, weisen analog zu den Untersuchungen von KNÖFEL &

WINNEFELD 1995 durch deutlich niedrigere w-Werte auf eine Verdichtung des Gefüges gegenüber den Proben hin, die ausschließlich ohne Behandlung in Laboratmosphäre carbonatisierten (Lagerung d). BÖTTGER (pers. com.) erzielte an Sandkalkproben durch die H_2O-Zwischenlagerung eine Zunahme der Festigkeit bei durchlässigeren Eigenschaften.

Tabelle 13: w-Werte in [kg/(m^2*√h)] der Mörtel nach unterschiedlichen Carbonatisierungsbedingungen:

	Putz I	Putz II	Putz III	Putz IV	Putz VII	Putz VIII
Lagerungsart a	2,8	4,4	4,7	4,5	6,2	5,3
Lagerungsart d	10,5	11,1	9,0	9,5	10,5	9,5

Des Weiteren kann die kapillare Wasseraufnahme der unbeschichteten Putze von Versinterungen beeinflusst werden. In Abbildung 51 sind im Fall von Putz IV die w-Werte einer sichtbar versinterten Probe (glänzend-glatte Oberfläche) den Werten einer unversinterten Probe gegenübergestellt. Durch die Sinterschicht wird die kapillare Wasseraufnahme gehemmt. Am Beispiel von Putz I wird deutlich, wie sich ein leichtes Aufrauhen der Probenoberfläche auf die kapillare Wasseraufnahme auswirkt. In beiden Fällen wird durch die Sinterschicht eine Differenz der kapillaren Wasseraufnahme von mehr als 6 kg/(m^2*√h) verursacht.

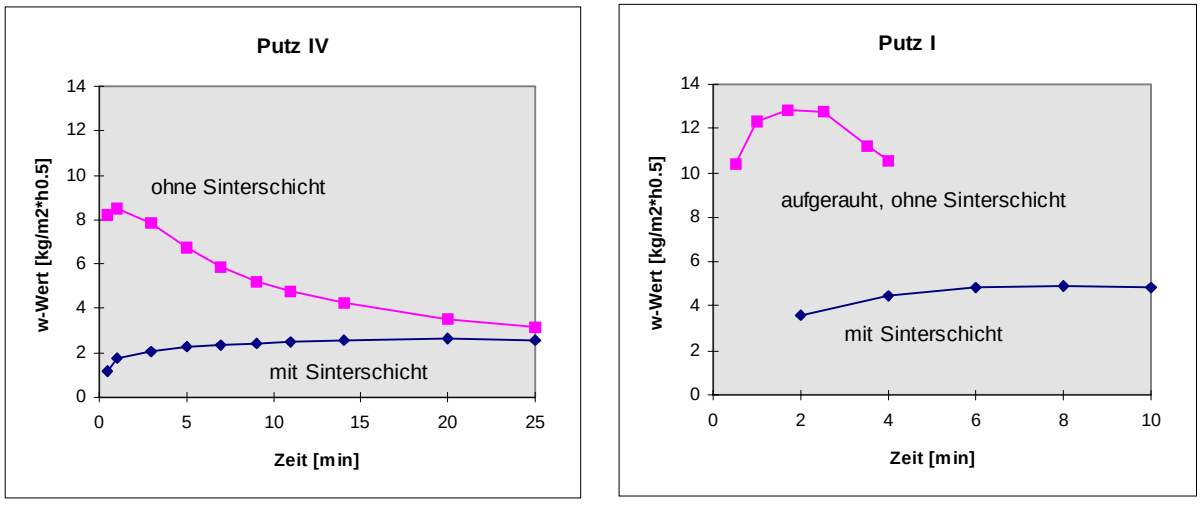


Abb. 51: Die Beeinflussung des w-Wertes durch das Vorhandensein einer Sinterschicht.

Da die Oberflächen nicht mit Hilfe eines Rütteltisches verdichtet, sondern nur per Hand geglättet wurden, sind aufgrund möglicher Inhomogenitäten durchaus leichte Schwankungen in den w-Werten zu erwarten.

4.2.2 Beschichtungssysteme

4.2.2.1 Zusammensetzung und Herstellung

Die Zusammensetzung der fünf verwendeten Beschichtungssysteme ist in Tabelle 14 wiedergegeben. Als Grundmaterial wurde verwendet:

- Sumpfkalk der Fa. Szeppek
- Kasein in Pulverform
- Leinölfirnis
- Wasser

Kalk- Kaseinansatz nach WEHLTE 1967:
40 g Kasein (Pulver)
125 g entmineralisiertes Wasser
33 g unpigmentierter Sumpfkalk

Das Kasein wird mit einem Teil des abgemessenen Wassers verrührt und stehengelassen um zu quellen. Am nächsten Tag wird das gequollene Kasein mit 33 g Sumpfkalk aufgeschlossen und mit dem restlichen Wasser vermengt.

Tabelle 14: Zusammensetzung der Beschichtungssysteme:

Nr.	Abkürzung, System	Sumpfkalk + Pigment* [g]	Kalk-Kasein-ansatz [g]	Leinöl [ml]	Wasser [ml]
1	K (Grundierung)	10,00	-	-	10,00
	K (Kalkfarbe)	10,00	-	-	5,00
2	kk (Grundierung)	6,60	0,45	-	9,90
	Kk (Kalk-Kaseinfarbe)	6,60	0,45	-	6,60
3	KK (Grundierung)	10,00	15,00	-	-
	KK (Kalk-Kaseinfarbe)	6,60	10,00	-	-
4	l (Grundierung)	6,60	0,45	1,00	10,20
	l (Kalk-Emulsion)	6,60	0,45	1,00	6,80
5	L (Grundierung)	6,60	1,50	3,00	6,80
	L (Kalk-Emulsion)	6,60	1,50	3,00	5,10

**400g Sumpfkalk mit 2g Ockerpigment innig vermischt*

Alle Zutaten wurden in einem Glaszylinder mit dem für die folgende Applikation vorgesehenen, leicht feuchtem Pinsel innig vermengt.

4.2.2.2 Applikation und Prüfkonzept

Vor der Beschichtung werden die Mörtelpräparate durch mehrmaliges Bestreichen mit Wasser gut vorgenäßt. Anschließend erfolgt die Applikation des jeweiligen Beschichtungssystems mit einem 2 cm breiten Haarpinsel. Um vergleichbare Schichtdicken zu erreichen, wird jeweils eine leicht abgestreifte Pinselfüllung zweifach in Längs- und Querrichtung auf der Probenoberfläche verteilt.

Die Beschichtungen wurden jeweils vor bzw. zwischen den in Tabelle 15 aufgelisteten Prüfungen an zwei unterschiedlich carbonatisierten Präparat-Serien vorgenommen:

1. Lagerungsart a / **Putzserie a** (Während der Carbonatisierung täglich mit Wasser besprüht):
   In dieser Versuchsreihe wurden alle Putzvarianten mit mindestens zwei bis zu maximal fünf Beschichtungen versehen, die jeweils nach der Prüfungseinheit kapillare Wasseraufnahme und Wasserdampf-Durchlässigkeit aufgetragen wurden.

2. Lagerungsart d / **Putzserie d** (Ohne weitere Behandlung unter Laborklima carbonatisiert):
   In dieser Versuchsreihe wurden ausgewählte Putzvarianten mit ein bis zu fünf Beschichtungen versehen. Dieser Versuch soll in Stichproben aufzeigen, inwieweit unterschiedliche Carbonatisierungsbedingungen einen Einfluß auf die kapillare Wasseraufnahme der Beschichtungen im Vergleich mit der ersten Probenserie haben. Zusätzlich wird an diesen Proben das Trocknungsverhalten geprüft.

Tabelle 15: Feuchtetechnische Prüfung der Verbundsysteme (die jeweilige Beschichtungsanzahl ist in den Spalten aufgelistet**:**

Putzserie der Lagerungsart **a**:

grundiert		**K**	**KK**	**kk**	**L**	**l**
Putz I	WdD	1 2	1 2	1 2 3	1 2 3	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2		1 2	1 2
Putz II	WdD	1 2	1 2	1 2 3	1 2 3	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2		3	1 2
Putz III	WdD	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3 5
	kap. Wass.	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Putz IV	WdD	1 2	1 2	1 2 3	1 2 3	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2		1 2	1 2
Putz VII	WdD	1 2	1 2	1 2 3	1 2	1 2
	kap. Wass.	1 2	1 2		1 2	1 2
Putz VIII	WdD	1 2	1 2	1 2 3	1 2	1 2
	kap. Wass.	1 2	1 2		1 2	1 2

Putzserie der Lagerungsart **a**:

Ohne Grundierung		**K**	**KK**	**kk**	**L**	**l**
Putz I	WdD	1 2 3 5	1 2 3 -	1 2 3	1 2 3 5	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2 3 -	3	1 2 3	1 2
Putz II	WdD	1 2 3 5	1 2 3 -	1 2 3	1 2 3 5	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2 3 -	3	3	1 2
Putz III	WdD	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3 5
	kap. Wass.	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Putz IV	WdD	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3	1 2 3 5	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2 3	3	1 2 3	1 2
Putz VII	WdD	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3	1 2 3 5	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2 3	3	1 2 3	1 2
Putz VIII	WdD	1 2 3 5	1 2 3 5	1 2 3	1 2 3 5	1 2
	kap. Wass.	1 2 3	1 2 3	3	1 2 3	1 2

Putzserie der Lagerungsart **d:**

Ohne Grundierung		**K**	**KK**	**kk**	**L**	**l**
Putz I	kap. Wass.	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	-	0 1 2 3 4 5
	Trocknung	2 5	2 5	2 5	-	2 5
Putz II	kap. Wass.	-	0 1 2 3 4 5	-	0 1 2 3 4 5	-
	Trocknung	-	2 5	-	2 5	-
Putz III	kap. Wass.	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	-	0 1 2 3 4 5
	Trocknung	2 5	2 5	2 5	-	2 5
Putz IV	kap. Wass.	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	-	0 1 2 3 4 5
	Trocknung	2 5	2 5	2 5	-	2 5
Putz VII	kap. Wass.	-	0 1 2 3 4 5	-	0 1 2 3 4 5	-
	Trocknung	-	2 5	-	2 5	-
Putz VIII	kap. Wass.	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	-	-	-
	Trocknung	2 5	2 5	-	-	-

Die Mittelwerte wurden jeweils aus drei Proben gebildet.

Eine mögliche Beeinflussung der Vorkonditionierung bzw. des Klimas auf die kapillare Wasseraufnahme wird an einigen Probekörpern aus beiden Versuchsserien untersucht.

4.2.2.3 Carbonatisierungsverhalten

Obwohl Kasein und Leinöl die Carbonatisierungsrate um ca. 10% gegenüber reinem Kalk (HERM et. al. 1993) reduzieren, waren alle Beschichtungen nach 2 Tagen Lagerung in Laboratmosphäre bei gut vorgenässtem Untergrund carbonatisiert.

4.3 Untersuchung der substratabhängigen Effekte

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der feuchtetechnischen Untersuchungen an den in Tabelle 15 aufgelisteten Verbundsystemen vorgestellt.
Es soll aufgezeigt werden, ob sich beschichtungsspezifische Eigenschaften in Abhängigkeit vom Untergrund unterschiedlich stark ausprägen und wie stark sich die hygrischen Eigenschaften der Verbundsysteme nach Mehrfachbeschichtungen verändern. Zur Erläuterung der Ergebnisse wird die jeweilige Putzcharakteristik des Trägersystems herangezogen (Porenraum, Körnung, Oberflächenmorphologie).

4.3.1 Wasserdampf-Durchlässigkeit

Die Versuche der Wasserdampf-Durchlässigkeit zeigen, daß mit reiner Kalkfarbe, Kalk-Kaseinfarbe und Kalk-Emulsion beschichtete Kalkputze, neben der erwarteten beschichtungssystem bedingten Abhängigkeit, eine deutliche Beeinflussung durch den Träger erfahren. In den Abbildungen 521-6 ist die Wasserdampfdurchlässigkeit der Prüfkörper mit wachsender Beschichtungsanzahl in µ-Werten (Diffusionswiderstandszahl) dargestellt. Die allgemein steigende Tendenz der µ-Werte mit fortschreitender Beschichtungsanzahl ist auf eine leichte Zunahme der Probendikke und die leichte Verdichtung der Probenoberfläche zurückzuführen.
Übergeordnet läßt sich folgende *beschichtungsabhängige Systematik* feststellen:

- Putzpräparate mit reiner Kalkfarbe (K) weisen generell die niedrigsten Diffusions-widerstandszahlen auf. Darauf folgen, mit unwesentlich höheren µ-Werten, Putze mit Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk). Bis auf Putz I und Putz II zeigen mit Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt (l) sowie die mit Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt (KK) versehenen Prüfkörper eine ähnliche Wasserdampf-Durchlässigkeit. Die mit Abstand höchsten µ-Werte werden von Verbundsystemen mit Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt (L) erreicht.

Zusätzlich ist eine vom *Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis des Trägers abhängige Aufteilung* festzustellen:

- Die beschichteten bindemittelreichen Putze I und II sind dampfdiffusionsdichter als die entsprechend beschichteten bindemittelärmeren Putze III, IV, VII und VIII.
- Bei den beschichteten Putzen mit höheren Bindemittelanteilen (Putz I und II, B/Z-Verhältnis = 1:2, nur Wkh) liegen die Werte der Kalk-Kaseinfarbe mit hohen

Kaseingehalt (KK) deutlich über den Werten der Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk). Sie werden gefolgt von der Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt (l). Bei der genauen Betrachtung der Kalk-Kaseinfarbe mit hohen Kaseingehalt (KK) ist eine gegenläufige Entwicklung festzustellen. Der µ-Wert nimmt mit jeder weiteren Beschichtung von 65 (52) auf 32 (25) merklich ab. Die Werte der Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt fallen in diesem Fall mit µ bis zu 190 (185) höher aus, als bei den restlichen Putzvarianten des B/Z-Verhältnisses von 1:5, die bei Putz III maximal einen µ-Wert von 85 erreichen. Selbst die Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt hebt sich auf den beiden Trägersystemen I und II sichtbar von den anderen Beschichtungsarten ab.

- Bei den Putzen mit geringeren Bindemittelanteilen (Putz III, IV, VII und VIII, B/Z-Verhältnis = 1:5, Wkh und Skh) ist eine weitere Unterteilung in Abhängigkeit des Bindemittels zu beobachten:

  Bei den beschichteten Weißkalkhydratputzen fallen die Werte der Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk) mit den Werten der Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt (KK) zusammen. Die Werte der mit Kalk-Emulsion, geringer Leinölgehalt (l) beschichteten Putze liegen nur unwesentlich darüber.

  Bei den beschichteten Sumpfkalkputzen (Putz VII und VIII) zeigen die Kalk-Kaseinfarben mit hohem Kaseingehalt (KK) dagegen deutlich größere µ-Werte als die Kalk-Kaseinfarben mit geringem Kaseingehalt (kk). Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen der Putze mit der Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt (l) liegen etwas höher.

Die Betrachtung der µ-Werte aller Verbundsysteme läßt ausgehend von der Zusammensetzung des Trägers folgende Zusammenhänge erkennen:

In Abhängigkeit von der Körnung:

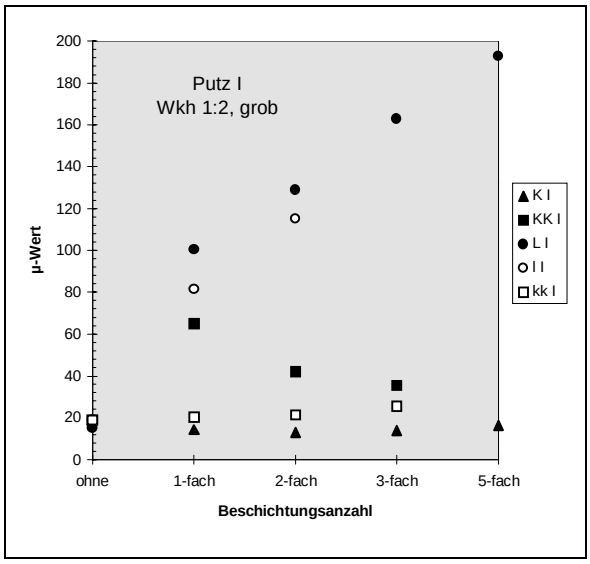
- weisen die beschichteten Putze mit dem Feinkornzuschlag (Putze II, IV, VIII) und dem höheren Anteil an Kapillarporen (vergl. Kapitel 4.2.1.4, III; Abbildung 48) etwas niedrigere µ-Werte auf, als die Putze mit dem Grobkornzuschlag (Putze I, III, VII).

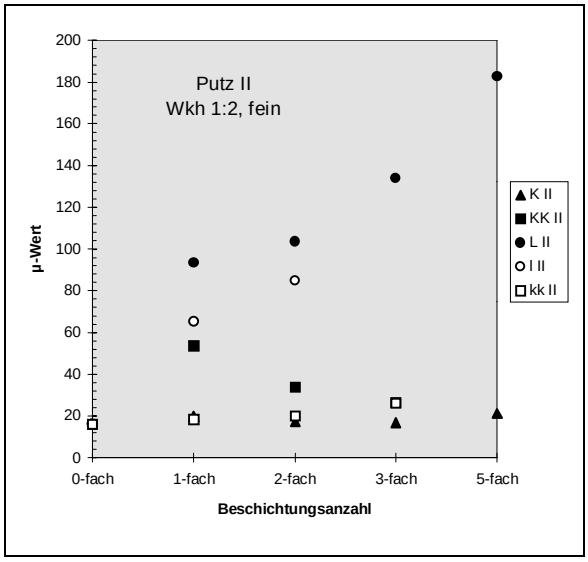
In Abhängigkeit vom Bindemittel/Zuschlagverhältnis:

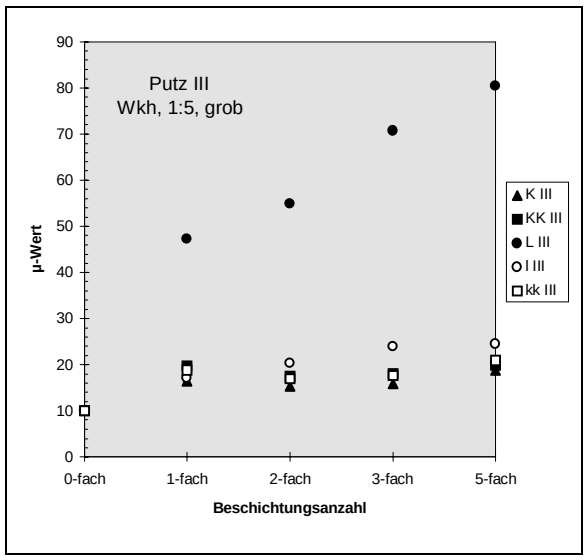
- sind die Verbundsysteme des B/Z-Verhältnisses 1:2 im Vergleich zu den entsprechenden Verbundsystemen des B/Z-Verhältnisses 1:5 dampfdiffusionsdichter.

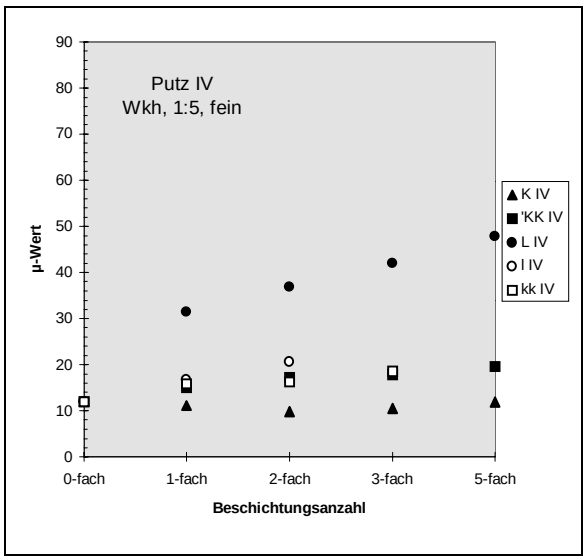
- ist die Spannweite der µ-Werte der unterschiedlich beschichteten Putze des B/Z-Verhältnisses 1:2 deutlich größer.
- liegen die µ-Werte der beschichteten Putze des B/Z- Verhältnisses 1:5 mit Ausnahme der Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt eng beieinander, im Falle der Mörtel-Rezeptur mit Weißkalkhydrat teilweise sogar fast aufeinander.

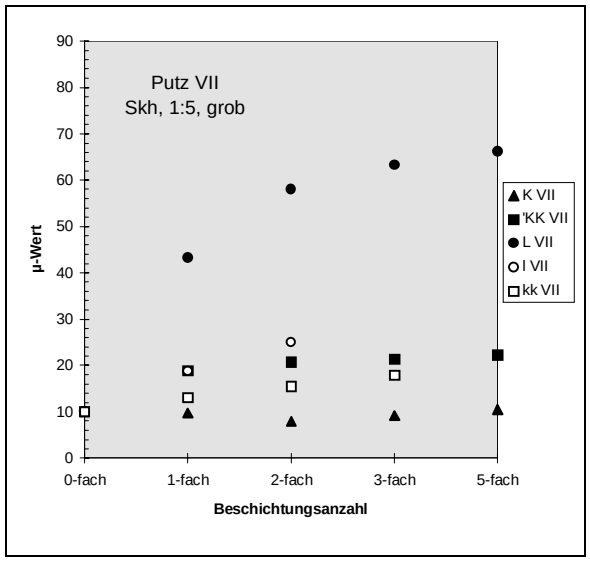
Übereinstimmend mit HERM et. al. 1993 zeigt sich, daß eine Kalk-Emulsion die Wasserdampf-Durchlässigkeit von Kalksystemen merklich reduziert. Bestätigt hat sich im Fall der getesteten Verbundsysteme jedoch nicht, daß durch eine Kasein-Zugabe der Wasserdampf-Diffusionswiderstand eines Systems im Vergleich zu einem reinen Kalksystem erniedrigt wird. In der Versuchsreihe dieser Arbeit liegen die µ-Werte der Kasein-Beschichtungen stets höher als die der reinen Kalkfarben.











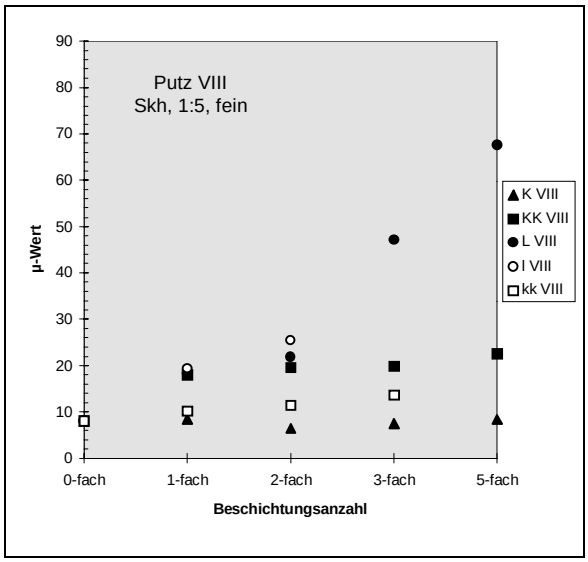


Abb. 52$_{1-6}$: Die Wasserdampf-Durchlässigkeit des Verbundsystems Putz/Beschichtung in Abhängigkeit von der Beschichtungsart und der wachsenden Beschichtunganzahl (Putzserie a; Putz I u. II abweichende Skalierung!).

4.3.2 Kapillare Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme eines Verbundsystems wird je nach Beschichtungsart von den feuchtetechnischen Eigenschaften der Beschichtung, den feuchtetechnischen Eigenschaften des Trägers sowie dessen Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst.
Unabhängig von der Beschichtungsanzahl und der Putzvariante läßt sich, beide Versuchsserien (unterschiedlich carbonatisierte Putze a und d) zusammengefaßt, folgende Systematik feststellen:
Alle Proben, die mit der Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt (L) versehen wurden, zeichnen sich durch eine geringe kapillare Wasseraufnahme aus. Die Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Werte) liegen ausnahmslos unter 1 kg/($m^2 * \sqrt{h}$). Die Werte der Verbundsysteme und der Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt (l) liegen etwas höher und in ähnlichen Bereichen wie Verbundsysteme und der Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt (KK). Eine Beschichtung mit reiner-Kalkfarbe wirkt ähnlich wie eine schwach konzentrierte Kalk-Kaseinfarbe (kk), durch die kapillare Wasseraufnahme des Trägers in den meisten Fällen nur geringfügig reduziert wird.
In Abbildung 53 und 54 sind die w-Werte der beschichteten Putze (unterteilt in Serie a und d) ohne Berücksichtigung der Beschichtungsfolge zusammengefaßt. Der Vergleich verdeutlicht, daß die Carbonatisierungsbedingungen der Putze und die dadurch induzierten feuchtetechnischen Unterschiede (siehe Kapitel 4.2.1.3) des Trägers sich merklich auf die kapillare Wasseraufnahme des Verbundsystems Putz/Beschichtung auswirken. Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Verbundsysteme nach dem Carbonatisierungsvorgang a (Serie a), die während der Carbonatisierungsdauer befeuchtet wurden, liegen im Vergleich der Beschichtungssysteme untereinander durchweg niedriger, als die nach dem Carbonatisierungsvorgang d (Serie d), die ohne weitere Befeuchtung carbonatisierten. Wider Erwarten sind auch die Systeme mit den wasserhemmenden bis wasserabweisenden Kalk-Emulsionen davon betroffen. Besonders die Kalk-Emulsionen mit geringen Leinölgehalten (l) zeigen teilweise im Verbund mit den Putzserien d einen anfänglich fünffach höheren w-Wert als mit den Putzserien a.

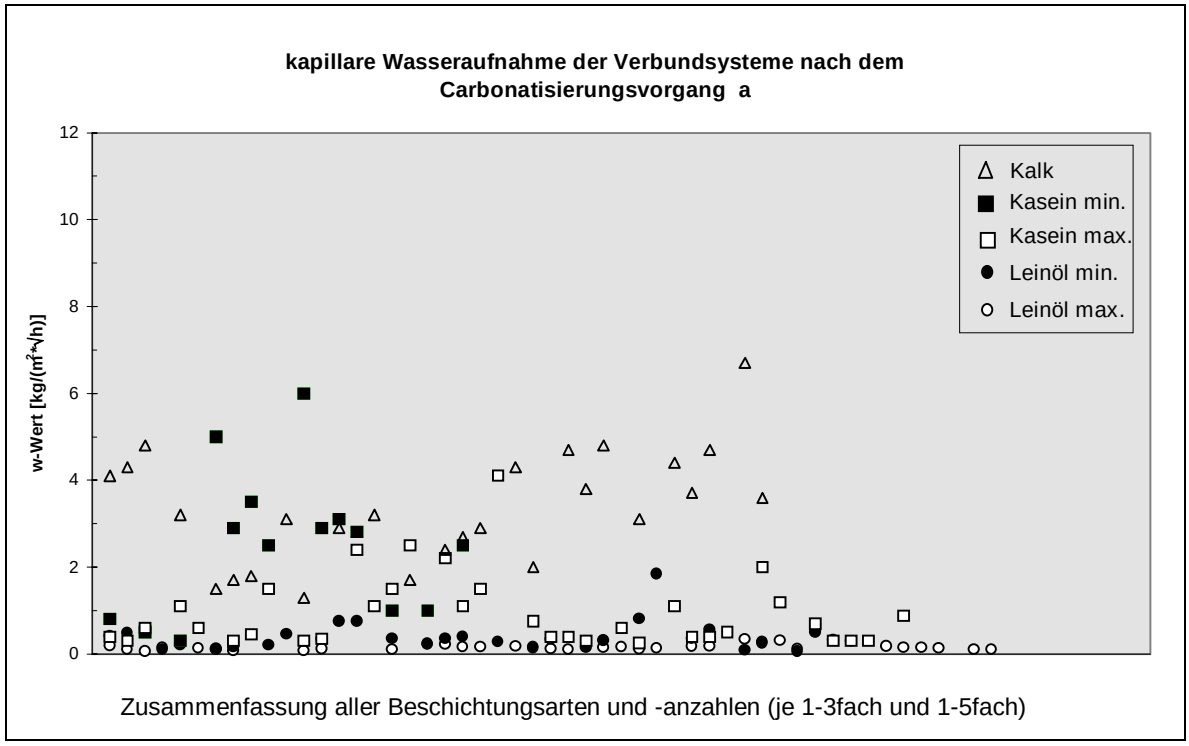


Abb. 53: Zusammenfassung aller w-Werte der beschichteten Putze der Serie a (unter regelmäßiger Befeuchtung carbonatisiert).

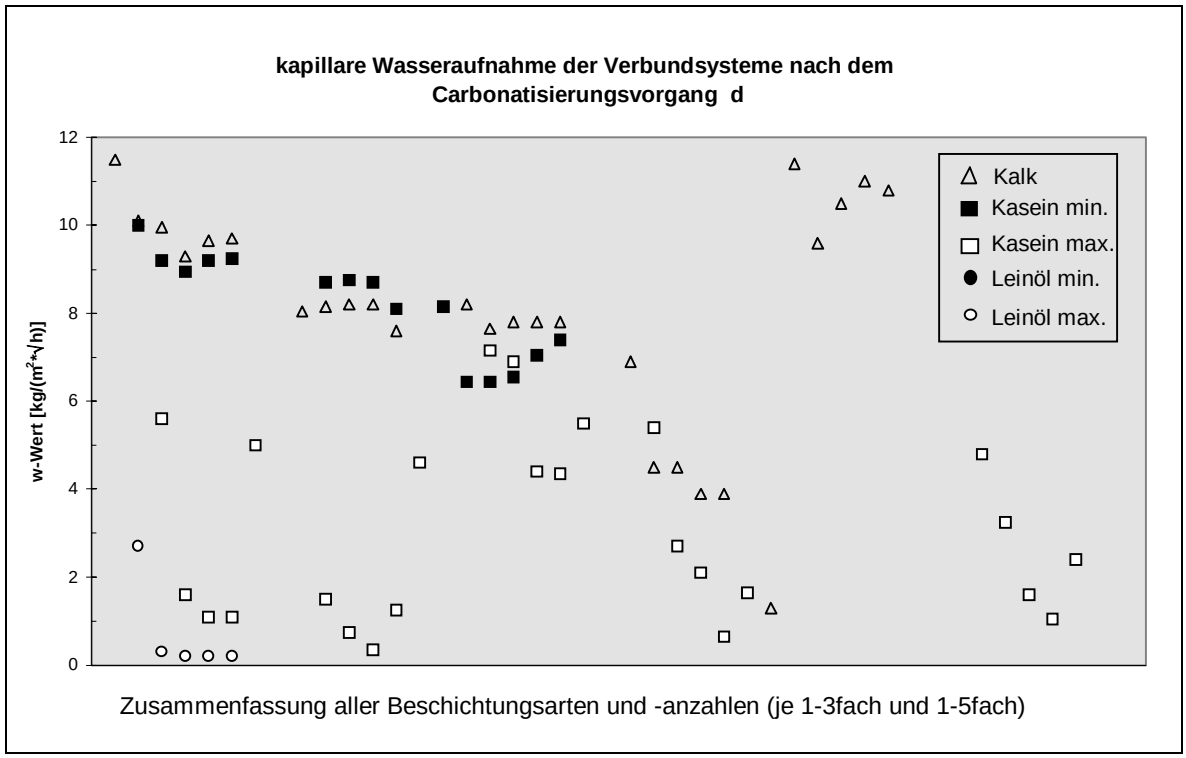


Abb. 54: Im Vergleich zu Abb. 53 zeigen die beschichteten Proben der Putzsyserie d (ohne Befeuchtung carbonatisiert) deutlich höhere Wasseraufnahmekoeffizienten.

Im Anschluß folgt die Darstellung der feuchtetechnischen Entwicklung von Mehrfachbeschichtungen am Beispiel einzelner Verbundsysteme. Eine Zuordnung von Abhängigkeiten durch die Zusammensetzung der Trägermaterialien (B/Z-Verhältnis, Sieblinie und Bindemittelart) wird in erster Linie an beschichteten Putzen vorgenommen, die während der Carbonatisierungszeit befeuchtet wurden (Serie a).

4.3.2.1 Verbundsysteme mit Kalk-Emulsionen

Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt (L):

Das Verbundsystem Putz/Kalk-Emulsion (L) zeichnet sich durch sehr niedrige Wasseraufnahmekoeffizienten aus. Mit wachsender Beschichtungsanzahl sind in der zeitabhängigen kapillaren Wasseraufnahme Veränderungen einer nur geringen Spanne der Wasseraufnahmekoeffizienten zwischen 0,05 und 0,35 kg/($m^2 * \sqrt{h}$) festzustellen.

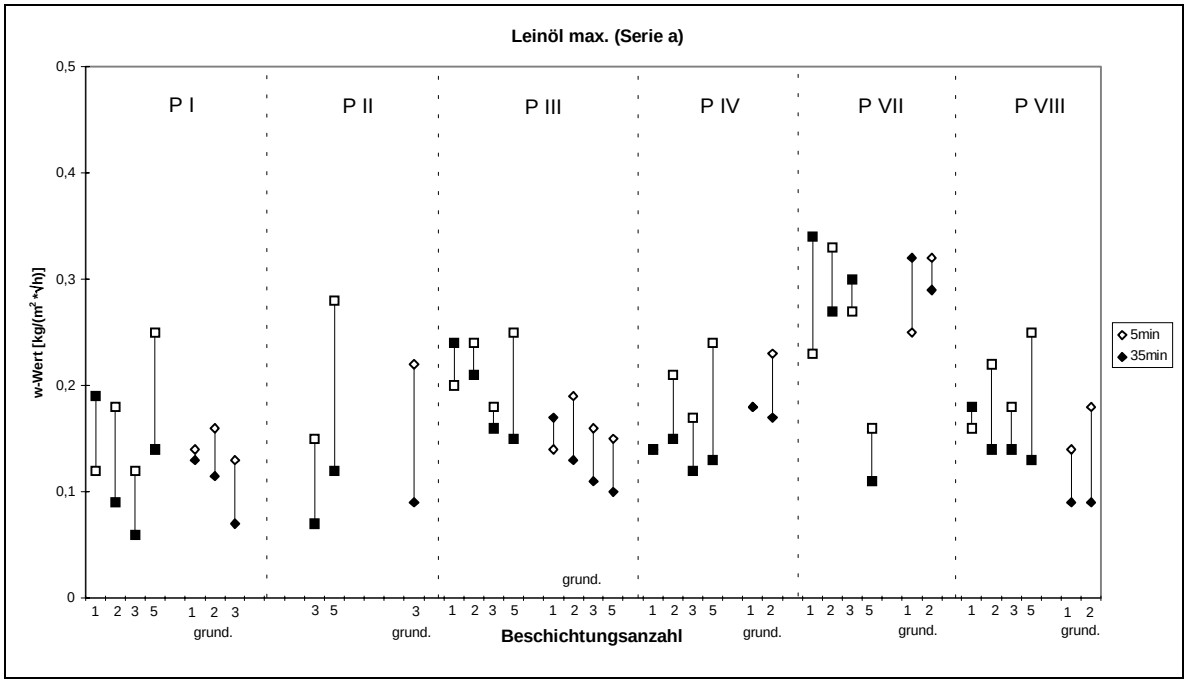


Abb. 55: Spanne der Wasseraufnahmekoeffizienten aller Beschichtungsfolgen der Putzserie a im System Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt und Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt grundiert. Ungefüllte Symbole = nach 5 min -, gefüllte Symbole = nach 35 min. Saugdauer

In Abbildung 55 sind die Spannweiten der Wasseraufnahmekoeffizienten aller geprüften Verbundsysteme Putz/Kalk-Emulsion (L) (quadratische Symbole) und Putz/Kalk-Emulsion (L) grundiert (Symbole in Rautenform) nach 5 min. und 35 min. Saugdauer dargestellt.
Der geringe Wert der kapillaren Wasseraufnahme nach 35 min nimmt in der Regel nach jeder folgenden Beschichtung leicht ab.
Nach der Applikation der ersten Schicht ist an fast allen Verbundsystemen im Laufe der Saugdauer noch eine leichte Zunahme oder ein Gleichbleiben des w-Wertes zu beobachten (die gefüllten Symbole liegen über oder auf den ungefüllten Symbolen). Die darauf folgenden Beschichtungen bewirken eine Veränderung: Der Wasseraufnahmekoeffizient sinkt mit zunehmender Saugzeit.
Werden nur die Werte der ersten Beschichtung miteinander verglichen, läßt sich eine Abhängigkeit der kapillaren Wasseraufnahme von der Zusammensetzung der Putze in Bezug auf die Sieblinie feststellen: Unabhängig vom B/Z-Verhältnis (1:2 (Wkh) oder 1:5 (Wkh und Skh)) weisen die beschichteten Putze jeweils mit der gröberen Körnung (PI a, PIII a, PVII a) einen höheren w-Wert auf, als die beschichteten Putze mit der feinen Körnung.
Das B/Z-Verhältnis des Trägers zeigt auf die dichte Kalk-Emulsion (L) kaum einen Einfluss. Die w-Werte der bindemittelreichen Verbundsysteme (PI und PII; B/Z-Verhältnis = 1:2) liegen nur geringfügig niedriger als die der bindemittelärmeren Systeme (PIII, PIV, PVII und PVIII; B/Z-Verhältnis = 1:5). Die vor der ersten Beschichtung grundierten Proben sind in noch geringerem Maße davon betroffen.
Die höchsten Wasseraufnahmekoeffizienten zeigen Putze mit dem B/Z-Verhältnis=1:5 und groben Zuschlag, also Putz III a und Putz VII a. Abweichungen, wie beispielsweise der höhere w-Wert nach der fünften Beschichtung von Putz I a und Putz II a, können auf Veränderungen der relativen Luftfeuchtigkeit während der Lagerung in Laboratmosphäre (nur Proben der Serie a) zurückgeführt werden, da Leinöl zu den quellfähigen Beschichtungen zählt. Auf den Klimaeinfluss bei feuchtetechnischen Untersuchungen an Beschichtungen wird ausführlicher in Kapitel 4.3.2.4 eingegangen.

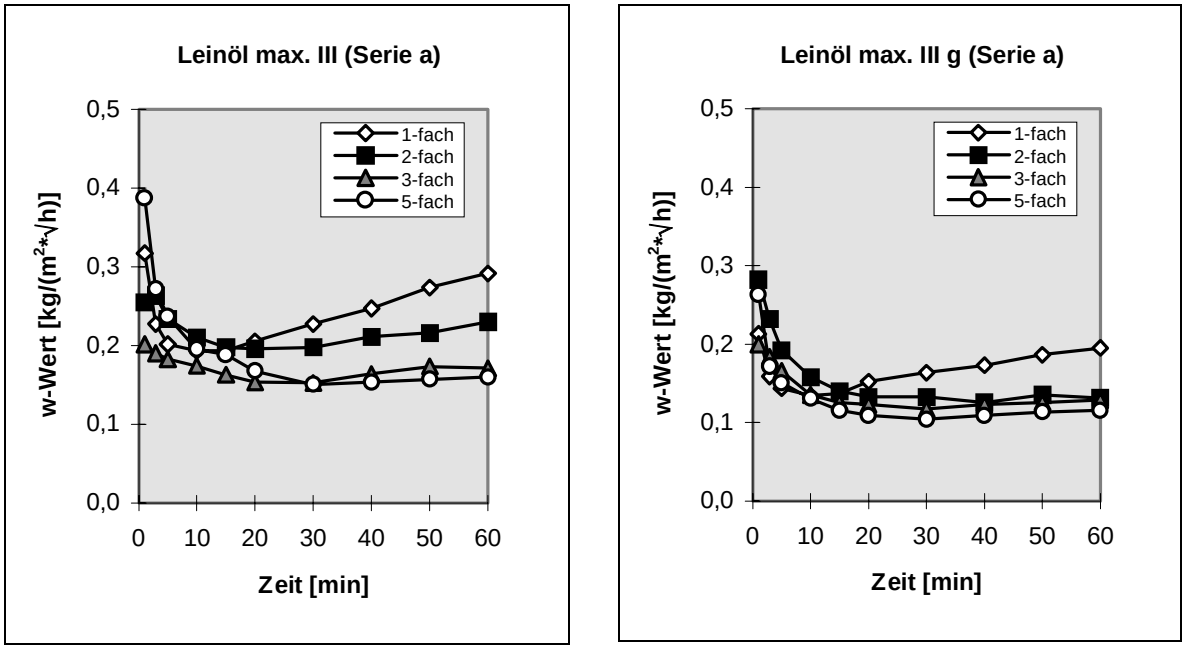


Abb. 56: Verlauf der zeitabhängigen kapillaren Wasseraufnahme nach wachsender Beschichtungsanzahl am Beispiel des Verbundsystems Putz III a/Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt (L) und Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt grundiert (L g).

Am Beispiel von Putz III a (Abbildung 56) läßt sich die Veränderung der Wasseraufnahmekoeffizienten mit fortschreitender Zeit und wachsender Beschichtungsanzahl erkennen. Der Wert nach 35 min. scheint hier aussagekräftiger für die jeweilige Beschichtungsfolge als der Wert nach 5 min., da durch den Quellvorgang der Kalk-Emulsion (L) zu Anfang des Saugvorganges mehr Wasser aufgenommen wird. Diese anfängliche Verdichtung äußert sich hauptsächlich in dem spontanen Absinken des w-Wertes innerhalb der ersten 10 min.. Danach stellt sich ein kontinuierlicher Wasserstrom ein. Eine Grundierung vor der ersten Beschichtung verstärkt die wasserhemmenden Eigenschaften bei diesen Verbundsystemen in geringem Maße.

Innerhalb der Serie d wurde nur Putz II mit der Beschichtung versehen und geprüft. Abbildung 57 zeigt, wie stark die kapillare Wasseraufnahme des zuerst unbeschichteten Putz II d bereits durch die erste Beschichtung abnimmt. Im Vergleich zu Putz II a (Abbildung 55), der während der Carbonatisierung befeuchtet wurde, liegt hier der w-Wert der ersten Beschichtung deutlich höher. Der Wasseraufnahmekoeffizient durch die nachfolgenden Beschichtungen nähert sich den durchschnittlichen Werten der Proben aus der Serie a an.

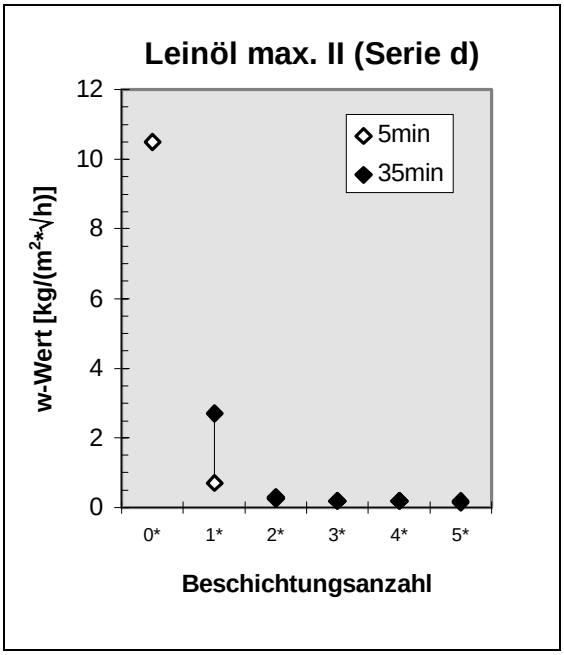


Abb. 57: Wasseraufnahmekoeffizienten des Verbundsystems Putz II d/Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt (L).

Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt (l):

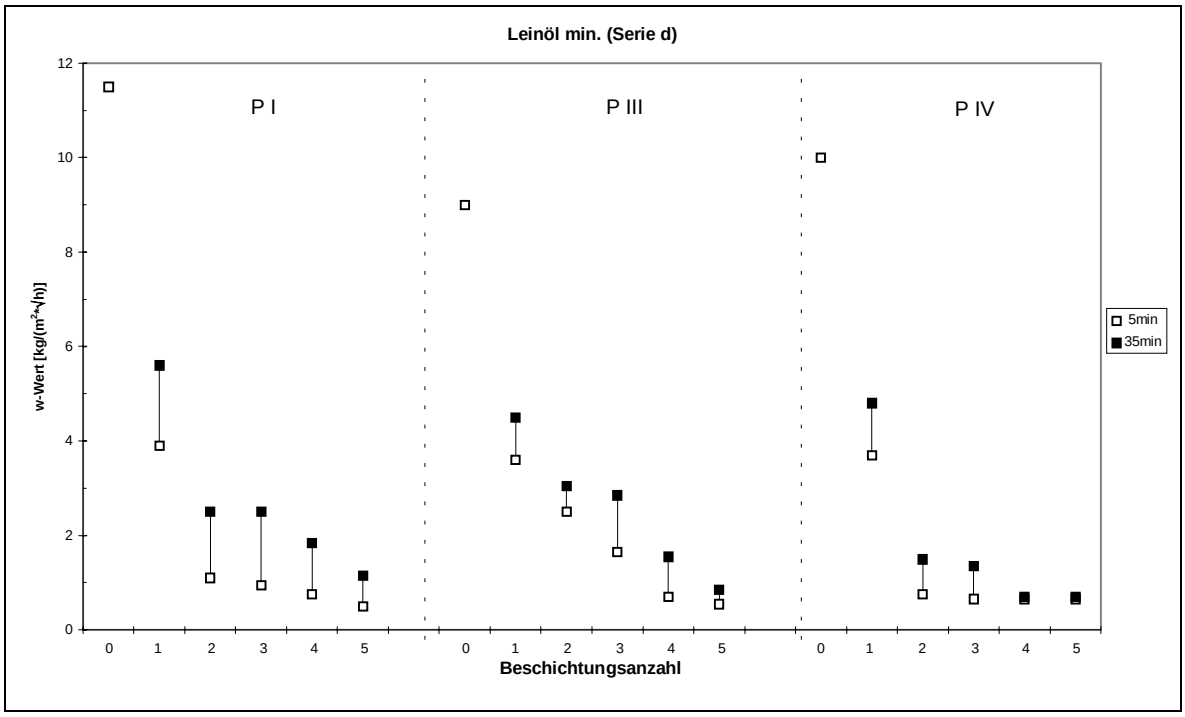


Abb. 58: Spannweiten der Wasseraufnahmekoeffizienten der Verbundsysteme Putz Id, IIId und IVd und Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt (l).

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Verbundsysteme Putz a/Kalk-Emulsion (l) und Kalk-Emulsion (l) grundiert liegt mit w-Werten unter 1 kg/(m^2*√h) (siehe Anhang) nur unwesentlich höher als die der vergleichbaren Verbundsysteme Putz a/Kalk-Emulsion (L) und Kalk-Emulsion (L) grundiert mit hohem Leinölgehalt. Auch in dieser Versuchsserie weisen jeweils die ersten Beschichtungen der Verbundsysteme mit Putzen der gröberen Körnung höhere w-Werte und die beschichteten Putze III a und VII a die höchsten w-Werte auf.
Im Vergleich zu den Putzen der Serie a sind die Wasseraufnahmekoeffizienten der Putze der Serie d (Abbildung 58) bis zu zehnfach höher. Mit jeder folgenden Beschichtung nimmt die mittlere kapillare Wasseraufnahme deutlich ab. Abweichend zu den mit Kalk-Emulsion (L) beschichteten Verbundsysteme kann ein weiteres Sinken der w-Werte innerhalb einer Meßsequenz nicht beobachtet werden.
Der grobkörnige Putz III d weist im Vergleich zu dem feinkörnigen Putz IV d ein leicht verzögertes Abnehmen des w-Wertes auf.

Zusammenfassend betrachtet sind folgende Entwicklungen im System Kalk-Emulsion/Kalkputz zu erkennen:

- Die Beschichtung mit Leinöl bewirkt eine mit zunehmender Beschichtungsanzahl geringer werdende kapillare Wasseraufnahme.
- Die Verbundsysteme mit der gröberen Putzkörnung zeigen höhere w-Werte als die beschichteten Putze mit einer feinen Körnung.
- Eine Beschichtung mit Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt verursacht spätestens nach der zweiten Applikation eine Verminderung des Wasseraufnahmekoeffizienten innerhalb eines Saugvorganges, die durch das Quellen des Leinöls hervorgerufen wird.
- Diese Verminderung des w-Wertes innerhalb einer Messung findet nach der Beschichtung mit Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt nicht statt, vielmehr ist hier ein Ansteigen oder höchstens ein Gleichbleiben der kapillaren Wasseraufnahme zu verzeichnen.
- Die Serie a zeigt im Vergleich niedrigere w-Werte als die Serie d.
- Die w-Werte sowie deren Abnahme nach folgenden Beschichtungen betreffend, finden sich in der Serie a zwischen den Kalk-Emulsionen mit hohem und niedrigem Leinölgehalt nur geringe, innerhalb der Serie d jedoch deutliche Unterschiede.

4.3.2.2 Verbundsysteme mit Kalk-Kaseinfarben

Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt (KK):

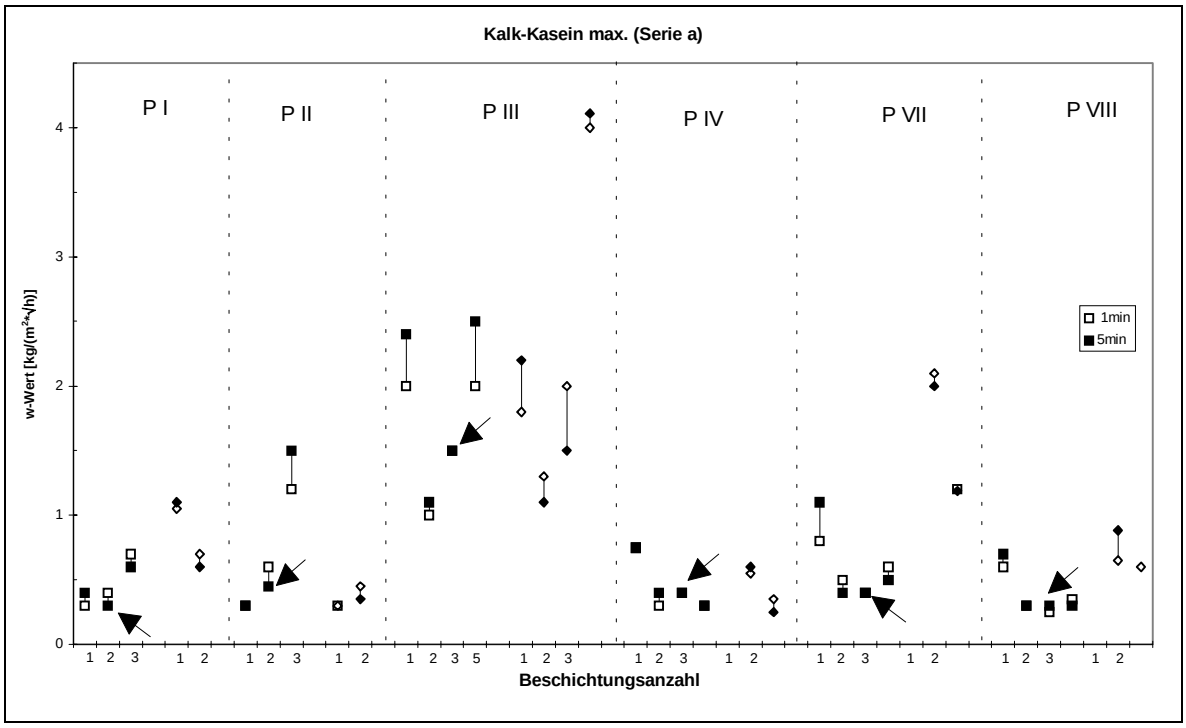


Abb. 59: Spannweiten der Wasseraufnahmekoeffizienten aller Beschichtungsfolgen der Putzserie a im System Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt (KK)und Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt grundiert (KKg).

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Verbundsysteme Putzserie a/Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt liegen etwas höher als die der Verbundsysteme Putzserie a/Leinöl min. Der große Unterschied zu den Kalk-Emulsionen besteht darin, daß die hoch dosierte Kalk-Kaseinfarbe ab einer bestimmten Beschichtungsfolge durch wachsende Spannungen zwischen Träger und Beschichtung zu Problemen führt, die sich nach anfänglichem Sinken der w-Werte durch plötzliches Ansteigen nach folgenden Beschichtungen äußern. Bei einigen Proben konnte parallel dazu das Auftreten von Mikrocraquelee in der Beschichtung beobachtet werden.

In Abbildung 59 markieren die Pfeile einen mit zunehmender Beschichtungsfolge gleichbleibenden oder steigenden w-Wert, der auf die Probleme an der Probenoberfläche hinweist. Dabei fällt auf, daß im Verbundsystem a bei den Putzen mit dem B/Z-Verhältnis von 1:2 die Wasseraufnahmekoeffizienten früher ansteigen (PI a, PIII a, PVII a - nach der zweiten Beschichtung) als bei den Putzen mit dem B/Z-Verhältnis von 1:5 (PII a, PIV a, PVIII a - nach der dritten Beschichtung). Da im

Beschichtungsystem Kalk-Kaseinfarbe (KK). zusätzlich alle Putzvarianten der Serie d untersucht wurden, bietet sich hier der direkte Vergleich mit der unter anderen Bedingungen carbonatisierten Putzserie a (Abbildung 59 und Abbildung 60) an:

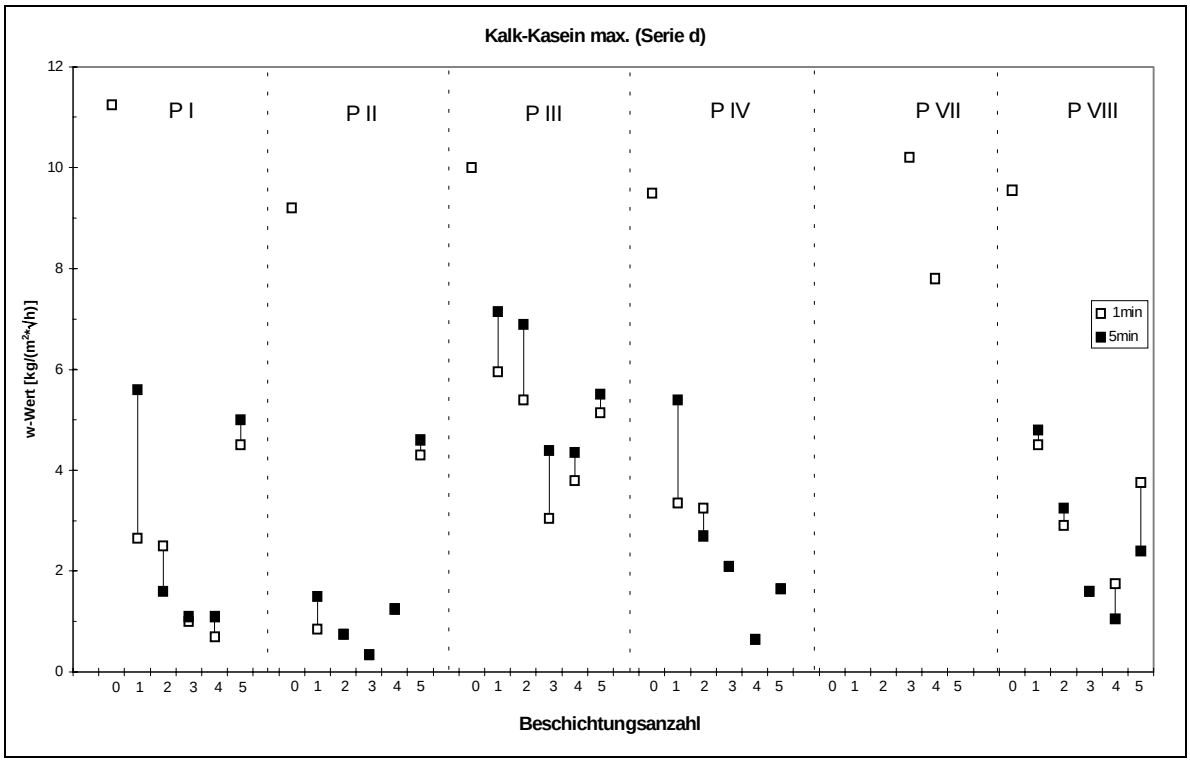


Abb. 60: Spannweiten der Wasseraufnahmekoeffizienten aller Beschichtungsfolgen der Putzserie d im System Kalk-Kasein max. Im Vergleich zur Putzserie a in Abb. 59 fallen die deutlich höheren w-Werte auf (abweichende Skalierung!)

Aus Abbildung 60 wird ersichtlich, daß auch in dieser Versuchsreihe die w-Werte der Verbundsysteme der Putzserie d deutlich höher liegen als bei der Serie a (Abbildung 59).

Die in der Serie a festgestellte Abhängigkeit von der Sieblinie des Trägers läßt sich in dieser Untersuchungsreihe ebenfalls bestätigen. Die Verbundsysteme mit der groben Körnung der Putze (PI d, PIII d, PVII d) zeichnen sich durch eine sichtlich stärkere kapillare Wasseraufnahme aus, als die äquivalenten Proben mit feiner Körnung (PII d, PIV d, PVIII d). Werden die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in Abbildungen 61 und 62 miteinander verglichen, kann man erkennen, daß die Kalk-Kaseinfarbe (KK) des feinkörnigen Putzes IV KK d ein deutlich feineres Rißsystem zeigt als die Beschichtung der grobkörnigen Probe III KK d.

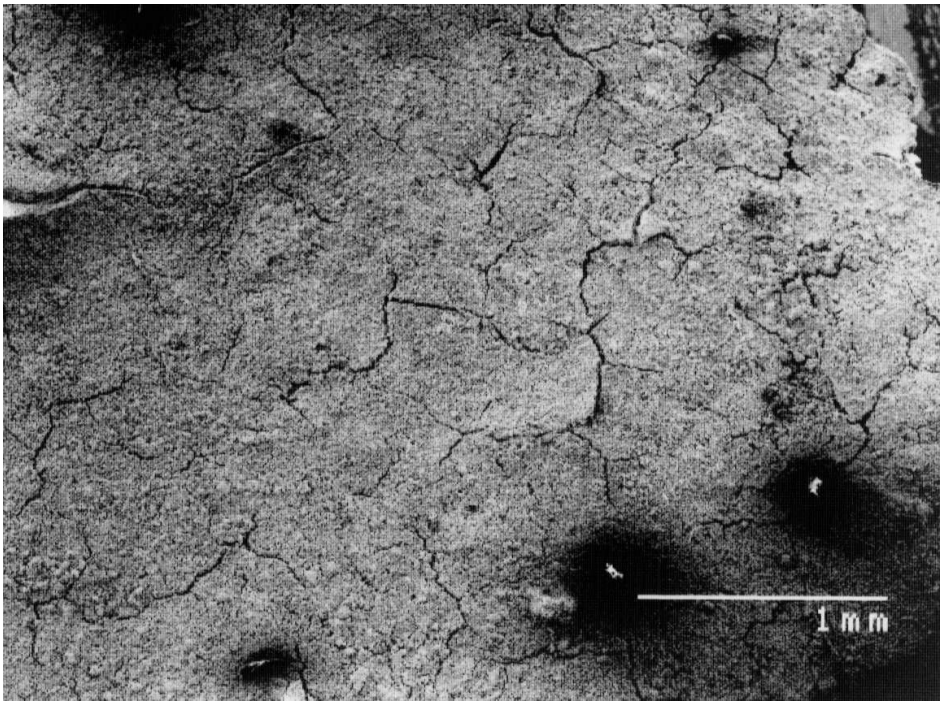


Abb. 61: REM-Aufnahme von der Oberfläche der Kalk-Kaseinfarbe von Probe IV KK d. Das Rissystem nach der fünften Beschichtung auf dem feinkörnigen Putzträger erscheint feiner als die auf der grobkörnigen Probe III KK d in Abb. 62 unten.

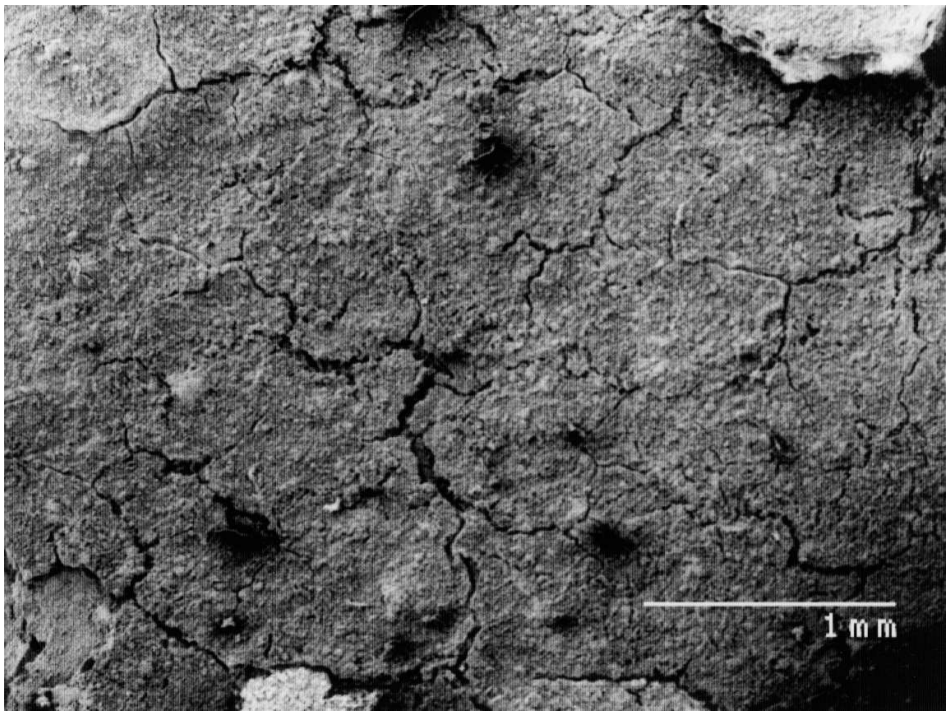


Abb. 62: REM-Aufnahme der Oberfläche der Kalk-Kaseinfarbe von Probe III KK d.

Bei der Betrachtung der w-Werte in Abbildung 59 fällt auf, daß die beschichteten Putze mit der groben Körnung innerhalb einer Meßeinheit spätestens nach der dritten Beschichtung eine steigende Tendenz erkennen lassen (w-Werte nach fünf Minuten (gefüllte Symbole) höher als nach einer Minute (ungefüllte Symbole)), während die Putze mit der feinen Körnung gleichbleibende oder abnehmende w-Werte zeigen.
Parallel zur Putzserie a wird bei den Putzen der Serie d (Abbildung 60) mit dem B/Z-Verhältnis von 1:2 (PI und II) ein früheres Ansteigen der w-Werte (nach der vierten (zweiten) Beschichtung) als auf den Putzen mit dem B/Z-Verhältnis von 1:5 (P III, IV, VII und VIII, nach der fünften (dritten) Beschichtung) beobachtet. Parallel zu den höheren w-Werten von Serie d treten bei grobkörnigen Putzen die Oberflächenprobleme der durch die Kalk-Kaseinfarbe (KK) induzierten Spannungen erst nach höherer Beschichtungsanzahl auf als bei der Serie a.
In Abbildung 63 läßt sich anhand der Probe II KK d erkennen, daß die Ablösungen nach der fünften Beschichtung teilweise bis in das Trägermaterial reichen. Der oberflächliche leichte Sinterhorizont des Trägers ist im Verbund mit der Beschichtung von dem darunterliegenden Quarzkorn getrennt.

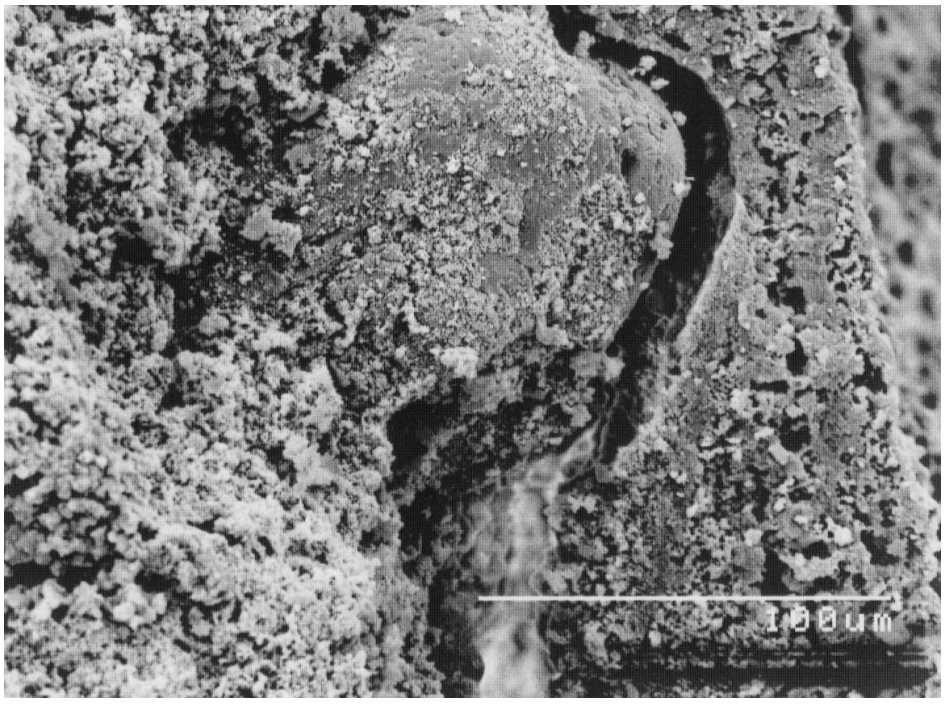


Abb. 63: REM-Aufnahme der Probe II KK d im Querbruch. Die spannungsreiche Kalk-Kaseinfarbe führt zu Ablösungen, die teilweise bis in den Träger reichen.

Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk):

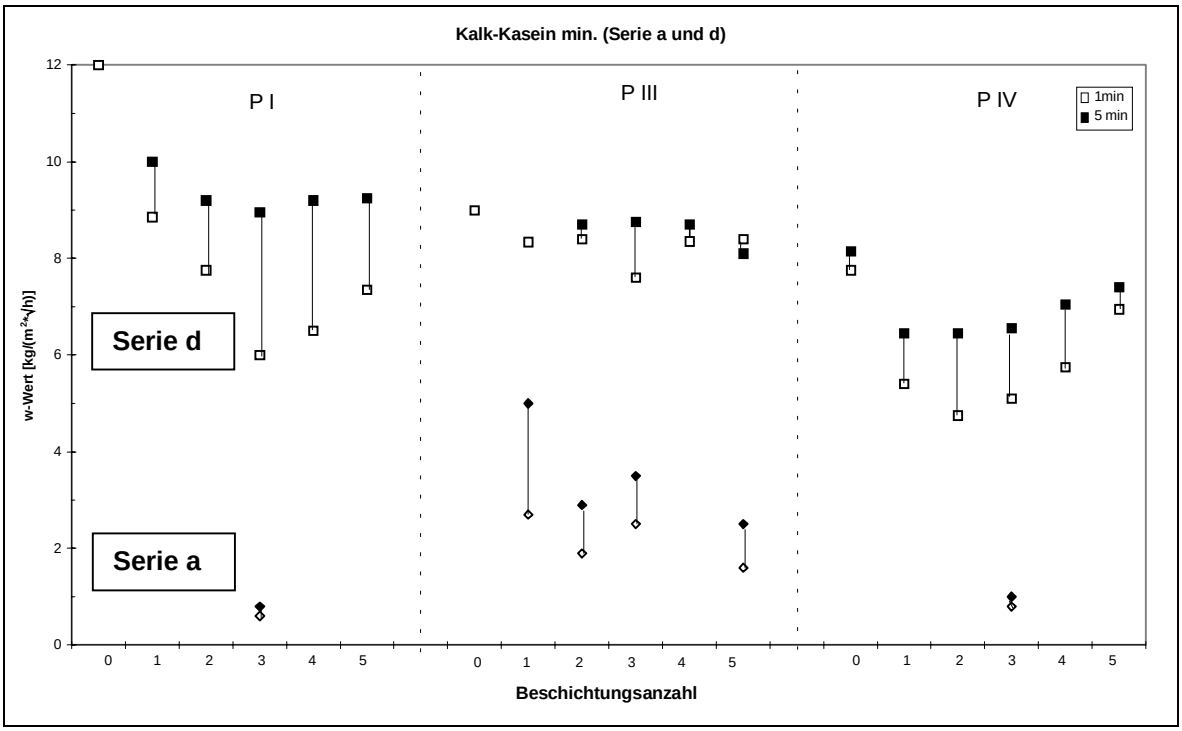


Abb. 64: Vergleich der kapillaren Wasseraufnahme des Verbundsystems Putz a und d / Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk). Die Proben der Serie a sind durch Rauten, die der Serie d durch Quadrate gekennzeichnet. In dieser Versuchsreihe fällt die Differenz zwischen Serie a und d besonders auf.

Bei den Bestimmungen der w-Werte an Verbundsystemen mit Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk) ist die Differenz zwischen den Verbundsystemen der Serien a und d mit Abstand am größten (Abbildung 64). In der Serie a liegen die w-Werte der dritten Beschichtung nur unwesentlich höher als in der Serie a der mit Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt (KK) beschichteten Putze.

In der Serie d steigt der w-Wert von PI, PII und PIV bis auf 10 kg/($m^2 \cdot \sqrt{h}$). Oberflächenprobleme durch zu große Spannungszustände lassen sich bei der geringen Kaseinkonzentration in beiden Versuchsreihen optisch nicht feststellen. Trotzdem sind steigende w-Werte (nach einer Minute) bei der Serie d ab der dritten Beschichtung zu beobachten. Der w-Wert nach 5 Minuten erhöht sich parallel dazu nur leicht.

Auch hier liegen die w-Werte des beschichteten grobkörnigen Kalkputzes III höher als die des feinkörnigen Putzes IV. Da innerhalb der Serie a bis auf Putz III nur jeweils die dritte Beschichtung erfaßt ist, lassen sich in dieser Versuchsserie keine mit den anderen Beschichtungssystemen vergleichbaren Rückschlüsse auf die Abhängigkeiten der Wasseraufnahmekoeffizienten von der Zusammensetzung des

Trägers ziehen.

Zusammengefaßt läßt sich festhalten:

- Die höhere Kaseinzugabe führt bei der Kalk-Kaseinfarbe nach einer bestimmten Anzahl von Beschichtungsfolgen zu Spannungen, die ein Aufreißen der Oberfläche bewirken. Die Risse ziehen sich teilweise bis in den Träger und äußern sich letztlich in einer ansteigenden kapillaren Wasseraufnahme.
- Diese Probleme treten verstärkt auf dichteren Putzoberflächen auf, die bei Putzen mit einem höheren B/Z-Verhältnis (1:2) oder Putzen der Serie a (Carbonatisierungsbedingungen) vorliegen.
- Die sich bereits bei den Beschichtungen mit Kalk-Emulsion abzeichnende Abhängigkeit von der Körnungsgröße des Trägers findet sich auch in dieser Versuchsreihe wieder.
- Die Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt führt zu keinen sichtbaren Rissen, nichts desto trotz sind innerhalb der Serie d nach der dritten Beschichtung ansteigende w-Werte zu beobachten.

4.3.2.3 Verbundsysteme mit reiner Kalkfarbe (K)

Innerhalb der Serie a liegen die Werte der kapillaren Wasseraufnahme kalkbeschichteter Putze bis auf P III (Abbildung 65) etwas höher als die entsprechenden Verbundsysteme mit der Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk) (Abbildung 64). Der im Gegensatz zu den anderen Putzsystemen gezackte Verlauf des Putzes III spiegelt sich sowohl bei der Kalkfarbe, als auch bei der Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt wider (Abbildung 64, Serie a). Möglicherweise liegt hier ein Meßfehler vor.
Auffallend sind in der Versuchsreihe der Serie a, die mit jeder weiteren Beschichtung tendentiell steigenden w-Werte der Putze I, II, IV, VII und VIII. Nach der fünften Beschichtung ist stets wieder ein Sinken zu verzeichnen.

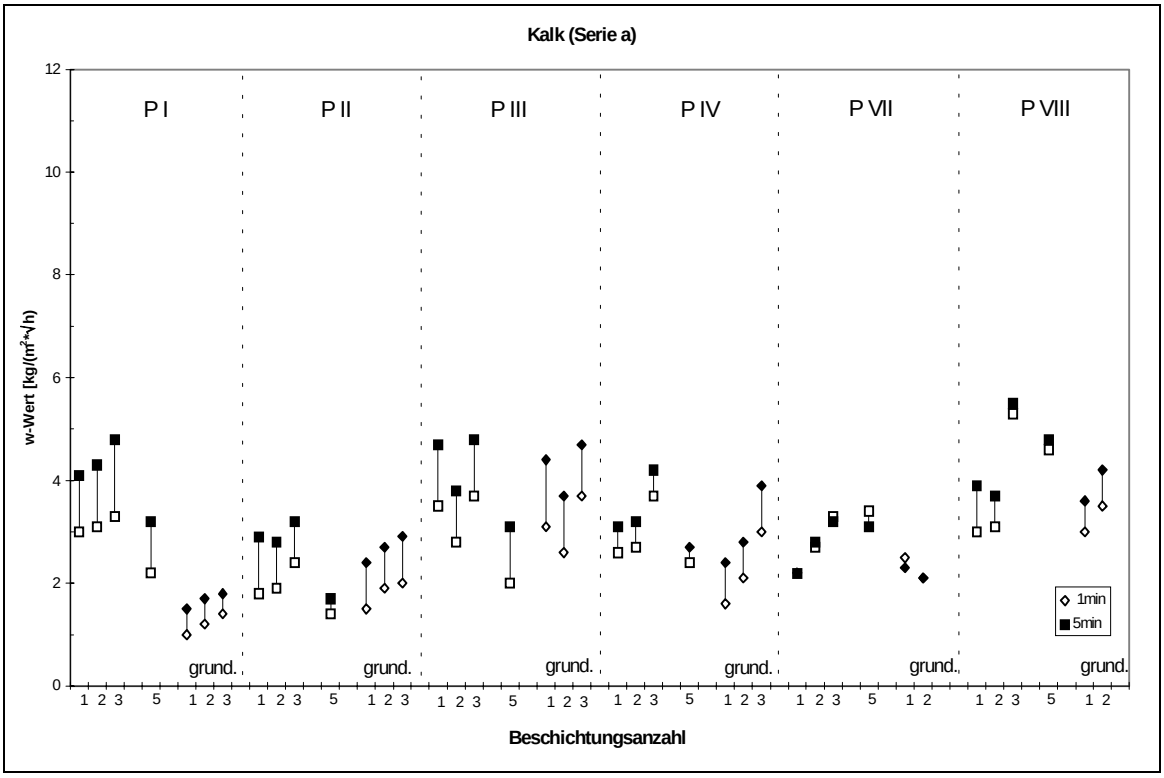


Abb. 65: Kapillare Wasseraufnahme des Verbundsystems Putzserie a / Kalkfarbe und Kalkfarbe grundiert.

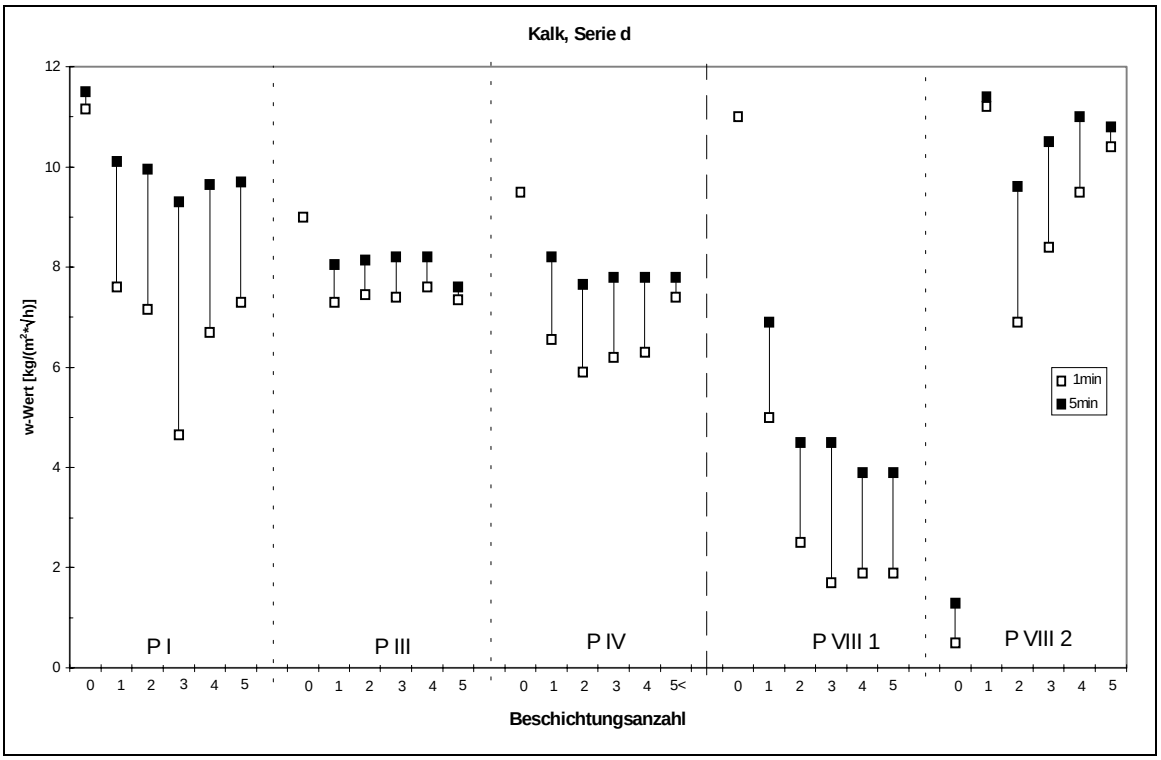


Abb. 66: Kapillare Wasseraufnahme des Verbundsystems Putzserie d / Kalkfarbe. Im der rechten Abbildungsteil ist die zeitabhängige Entwicklung der w-Werte einer nicht versinterten (PVIII 1) und einer versinterten und vor der ersten Beschichtung aufgerauhten Probe (PVIII 2) dargestellt.

Die grundierten Proben weisen in der Regel eine etwas geringere kapillare Wasseraufnahme auf als die nicht grundierten Proben. Hier zeichnet sich ebenfalls eine Abhängigkeit von der Körnungsgröße des Trägers ab. Mit der Ausnahme von PVII a liegen die w-Werte der grobkörnigen Verbundsysteme über den Werten der feinkörnigen Verbundsysteme.

Innerhalb der Serie d ähneln sich die w-Werte und deren Verlauf der Putze PI d, PIII d und PIV d mit reiner Kalkfarbe und Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt stark (vergl. Abbildung 64 und Abbildung 66). Im Gegensatz zu den Proben aus dem System Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt weisen die rein kalkbeschichteten Proben jedoch eine größere w-Wertspanne, also ein etwas höheres Saugvermögen innerhalb einer Messung auf.

Ein Aufrauhen der Probenoberfläche vor dem Beschichten hat, wie an Probe PVIII 2 in Abbildung 66 ersichtlich, einen großen Einfluss auf die weitere kapillare Wasseraufnahme folgender Beschichtungen. Das Ansteigen der Werte bei PVIII 2 mit gleichzeitiger Verringerung der Spannweite ist vermutlich auf die Veränderung der oberflächlichen Porenstruktur durch die Beschichtung und dem damit veränderten hygrischen Kontakt zum Untergrund zurückzuführen.

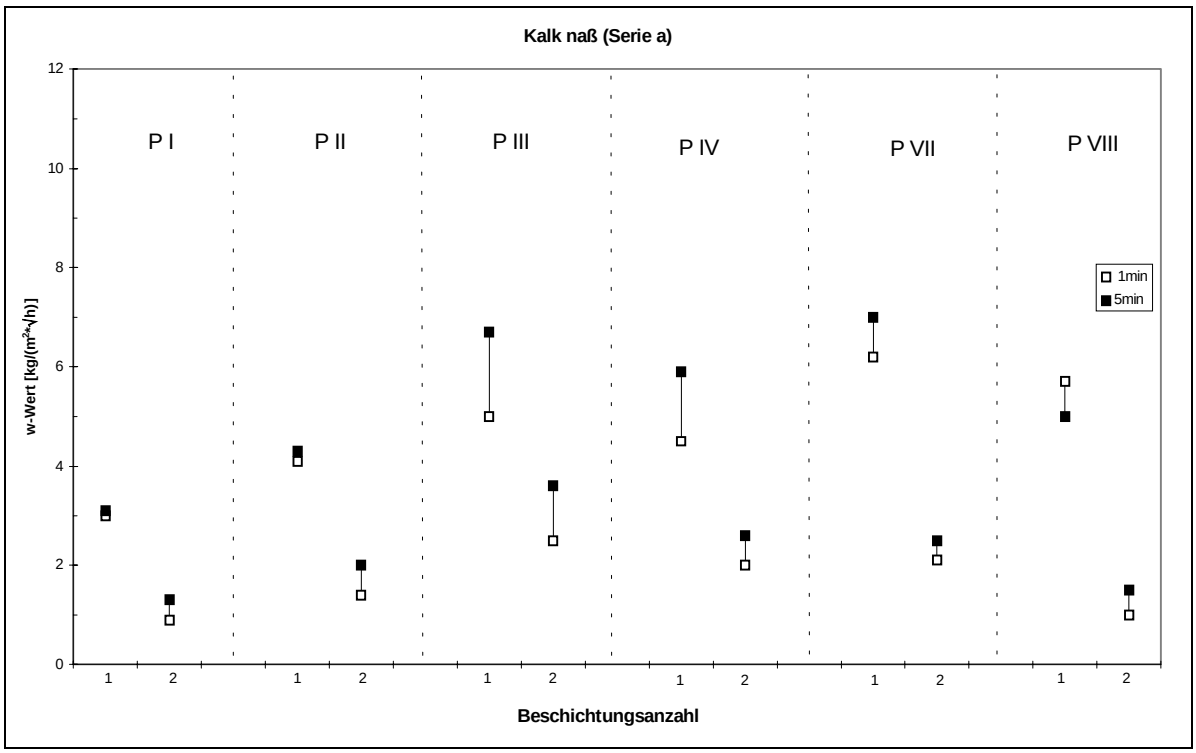


Abb. 67: Kapillare Wasseraufnahme der noch in herstellungsfeuchtem Zustand befindlichen erstmals mit reiner Kalkfarbe (K) beschichteten Putze der Serie a.

In Abbildung 67 ist die kapillare Wasseraufnahme der noch in herstellungsfeuchtem Zustand mit Kalk beschichteten Putze der Serie a dargestellt. Aufgrund des vergleichsweise hohen w-Wertes nach der ersten Beschichtung und des starken Sinkens nach der zweiten Beschichtung wird angenommen, daß die erste Behandlung noch keinen deckenden Effekt im Sinne einer Beschichtung bewirkt hat, sondern dieser Wert dem unbeschichteten Putz (evtl. mit leichter Bindemittelanreicherung an der Oberfläche der Probe) sehr nahekommt. Vergleichbar große Differenzen in den w-Werten lassen sich zwischen dem unbeschichteten Putz und der ersten Beschichtung der kalkbeschichteten Verbundsysteme der Serie d in Abbildung 66 erkennen.
Anhand der Darstellung in Abbildung 67 ist bei den bindemittelärmeren Putzvarianten der Serie d (PIII - PVIII) eine leichte Abhängigkeit der Wasseraufnahme beschichteter Proben von der Sieblinie des Trägers abzulesen. Wie auch bei den mit den Kalk-Emulsionen und der Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt beschichteten Putze zeigen die Verbundsysteme mit der gröberen Sieblinie den jeweils höheren w-Wert.

4.3.2.4 Einfluss des Klimas und der Vorkonditionierung der Proben

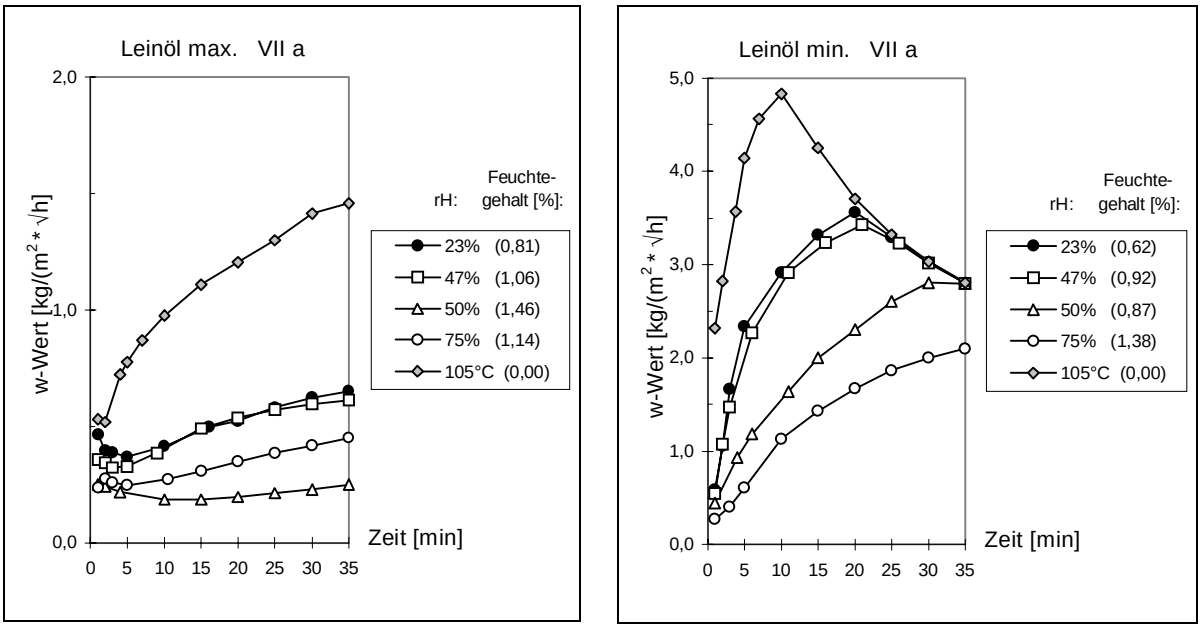


Abb. 68a und b: Intensitätsverlauf der Wasseraufnahme von Verbundsystemen mit Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt. Bei beiden Proben hat sich jeweils bei der Messung unter 50% relativer Luftfeuchtigkeit die Gleichgewichtsfeuchte in den Prüfkörpern noch nicht eingestellt.

Aufgrund der leichten Schwankungen der im Laborklima gelagerten Proben der Serie a mit Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt (siehe unter Abbildung 55), wurde anhand von ausgewählten Verbundsystemen die kapillare Wasseraufnahme unter definierten Klimabedingungen geprüft. Die Untersuchungen führen zu dem Ergebnis, daß Verbundsysteme mit einer quellenden Beschichtung Klima-, bzw. Feuchteabhängigkeiten aufweisen.
Die in den Diagrammen errechneten Feuchtegehalte ergeben sich durch die jeweiligen relativen Gewichtsverhältnisse im Bezug zur am Ende der Messung bei 105° C getrockneten Probe.
Abbildung 68 a und b zeigen, daß der Wasseraufnahmekoeffizient einer quellenden Beschichtung sowohl von der Umgebungsfeuchte, als auch von der Probenfeuchte abhängt. Bei 50% rel. Luftfeuchtigkeit liegt in Abbildung 68 a der Feuchtegehalt der Probe, gemessen an den Werten der Messungen bei weiteren Luftfeuchtigkeiten im Vergleich zu hoch; in Abbildung 68 b entsprechend zu niedrig (Je höher die rel. Luftfeuchtigkeit während der Vorkonditionierung, desto höher sollte auch der rel. Feuchtegehalt der Probe liegen). Dabei zeigt sich, daß die Messung des w-Wertes einerseits eine deutliche Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte aufweist; je höher die rel. Luftfeuchtigkeit ist, desto geringer wird der w-Wert ein und der selben Probe (Abbildung 68 b). In gleicher Weise beeinflusst die Probenfeuchte das kapillare Saugverhalten: je höher der Feuchtegehalt des Probenkörpers ist, desto geringer fällt der w-Wert aus (Abbildung 68 a). Ob die Umgebungsfeuchte oder die Probenfeuchte den stärkeren Einfluss zeigt, läßt sich anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht klären.
Die klimatische Beeinflussung des Wasseraufnahmekoeffizienten ist bei dem Großteil der mit Kalk-Emulsionen (L, l) und mit Kalk-Kaseinfarben mit hohem Gehalt an Kasein (KK) beschichteten Systeme festzustellen (siehe Anhang). Im Vergleich dazu zeigen die Verbundsysteme mit Beschichtungen aus reiner Kalkfarbe (K) sowie der Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt (kk) entweder Schwankungen, die nicht konkret den Klimabedingungen zugeschrieben werden können, oder keine auffällige Veränderung des w-Wertes in unterschiedlichen rel. Luftfeuchtigkeiten, wie in Abbildung 69 ersichtlich ist.
Die Trocknung bei 105° C bewirkt bei allen Proben eine deutliche Zunahme des w-Wertes.

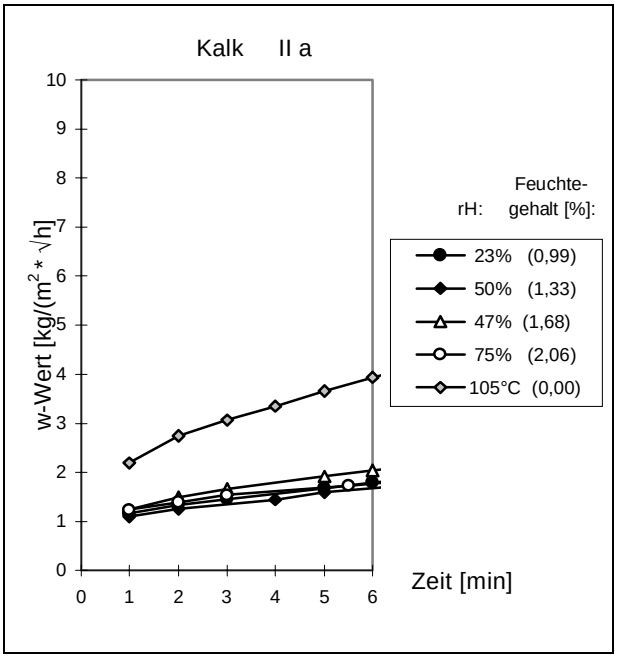


Abb. 69: Im Gegensatz zu den mit Kalk-Emulsion und Kalk-Kaseinfarbe beschichteten Proben bleibt der Wasseraufnahmekoeffizient relativ konstant (durchcarbonatisierte Probe).

Ein weiteres interessantes Phänomen wurde im Zuge dieser Untersuchungen beobachtet. Im Vergleich der Klimabedingungen mit den jeweiligen Feuchtgehalten der Proben wurden bei einigen Proben nach der Trocknung bei 105° C anfänglich „negative Feuchtegehalte“ errechnet, die mit fortschreitender Behandlung kontinuierlich in positive, den Luftfeuchten entsprechende Probenfeuchten übergingenhen (siehe Abbildung 70). Solange „negative Feuchtegehalte“ vorliegen, nimmt auch der Wasseraufnahmekoeffizient unabhängig von den Klimabedingungen kontinuierlich ab. Zeigen die Proben einen Feuchtegehalt annähernd null % oder steigt dieser gemäß der relativen Luftfeuchtigkeit an, verändern sich die w-Werte der Verbundsysteme mit quellenden Beschichtungen nur noch in Abhängigkeit von der umgebenden Feuchte.

Das „Phänomen“ der negativen Feuchtegehalte wird auf eine unvollständige, im Laufe der Messung aber zunehmende Carbonatisierung zurückgeführt. Die damit verbundene Gewichtszunahme der Probe bedingt rechnerisch die anfänglich negativen Feuchtegehalte. Eine fortschreitende Carbonatisierung macht sich also durch ein leichtes Ansteigen des Probengewichts, bzw. durch abnehmende „negative Feuchtegehalte“ der Probe im Vergleich zu den Werten der vollständig carbonatisierten Probe nach der Trocknung bei 105°C bemerkbar. Das heißt, im Laufe der fortschreitenden Carbonatisierung eines Verbundsystems nimmt der w-Wert unabhängig von den umgebenden Feuchtebedingungen ab. Erst nach vollständiger Carbonatisierung folgt der w-Wert des Verbundsystems den vorangehend beschriebenen Feuchteabhängigkeiten.

Im Fall von Kalk I d ist erst nach den ersten drei Messungen (Abbildung 70, Legende von oben gelesen: bei 50%, 25% und 23% rel. Luftfeuchtigkeit) eine vollständige Carbonatisierung erreicht. Danach folgen die w-Werte den vorher beschriebenen Abhängigkeiten. Die Wasseraufnahmekoeffizienten des Verbundsystems liegen allerdings jetzt im Bereich der Wasseraufnahmekoeffizienten der kalkbeschichteten Verbundsysteme der Serie a (vergl. Kalk II a).

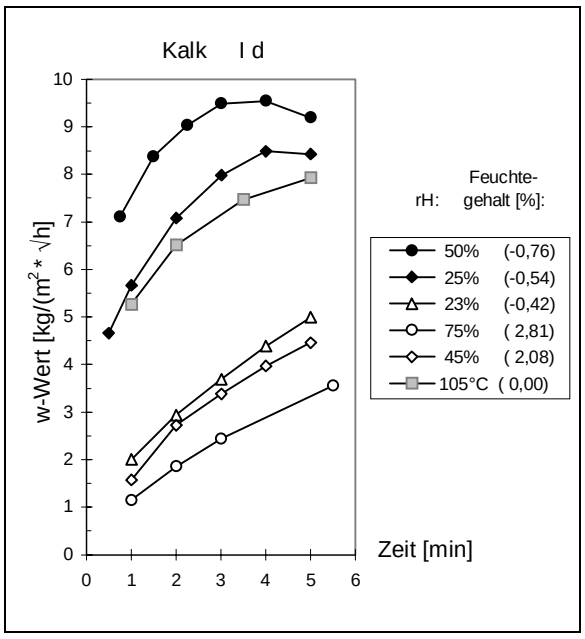


Abb. 70: Einfluss der bis zur dritten Klimaprüfung (Legende von oben gelesen) zunehmenden Verdichtung durch fortschreitende Carbonatisierung (errechnete „negative Feuchtegehalte“, siehe Erläuterung) des Verbundsytems Kalk I d.

Das starke Absinken der w-Werte bei Kalk I in Abbildung 70 ist auf eine, durch die Behandlung induzierte Versinterung zurückzuführen d (und weiterer Proben, siehe Anhang/Klimaabhängigkeit). Da Putz I nicht vollständig durchcarbonatisiert war (Kapitel 4.2.1.4), konnte vermutlich mäßig lösliches $Ca(OH)_2$ mobilisiert werden und sich während der Trocknung an der Probenoberfläche anreichern und carbonatisieren ($CaCO_3$ = schwer löslich: 14 mg/l (20°C); $Ca(OH)_2$ = mäßig löslich: 1,26 g/l (HOLLEMANN-WIBERG 1976).

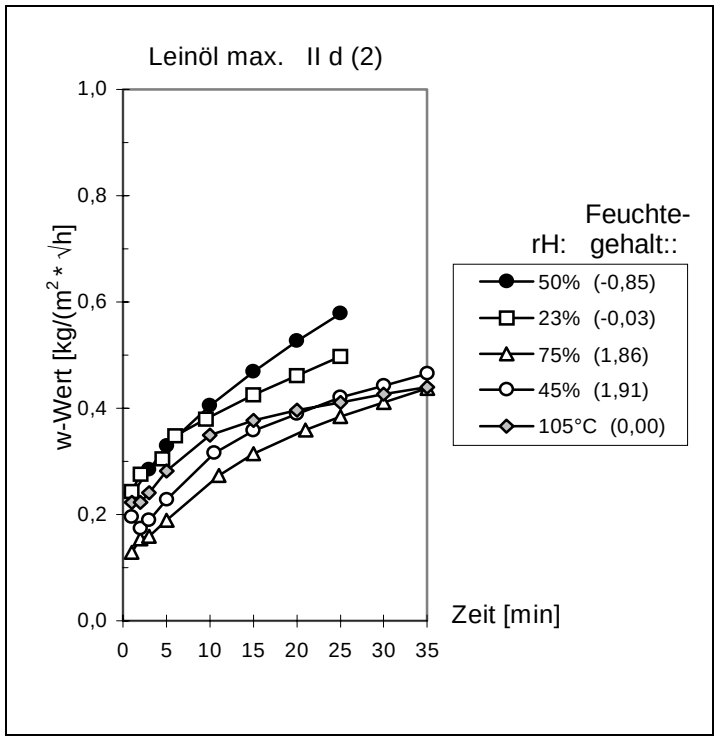


Abb. 71: Vom Klima unabhängige w-Wert-Entwicklung der Probe II L d, die gemessen an der Trocknung bei 105°C durch negative Feuchtegehalte auf eine fortschreitende Carbonatisierung schließen lassen.

Während der ursprünglichen Untersuchung der kapillaren Wasseraufnahme mit fortschreitender Beschichtungsanzahl (Kapitel 4.3.2.1 - 4.3.2.3) konnte eine Versinterung auf diesem Wege nicht entstehen, da die Oberfläche durch die Neubeschichtung immer wieder aufgerauht und neu gestaltet wurde. In der Untersuchung der Klimaabhängigkeit wurde jedoch keine weitere Beschichtung vorgenommen.

Die vollständige Carbonatisierung der Probe II L d wird ebenfalls erst im Laufe der Klimaversuche erreicht (Abbildung 71). Auf der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme in Abbildung 72 lassen sich die durch den Verdunstungstransport entstandenen Calcit-Anreicherungen an der Oberfläche erkennen.

Nach einer Trocknung bei 105°C ist bei den meisten vollständig carbonatisierten Proben eine deutliche Zunahme des Wasseraufnahmekoeffizienten zu beobachten, die entweder auf eine Veränderung der Oberflächen der Beschichtung oder der Oberflächeneigenschaften in den Kapillarporen zurückgeführt werden muß.

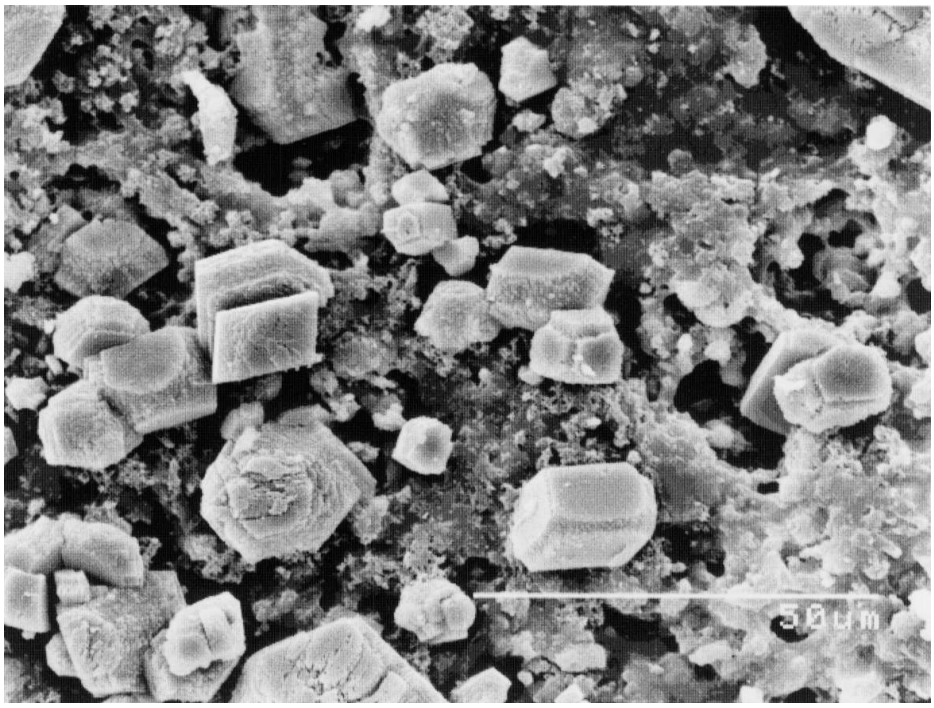


Abb. 72: Calcit-Anreicherungen an der Oberfläche der im Klimaversuch carbonatisierten Probe II L d.

4.3.3 Trocknungsgeschwindigkeit

Einige ausgewählte Verbundsysteme der Serie d wurden nach der zweiten und der fünften Beschichtung zur Prüfung der Trocknungsgeschwindigkeit herangezogen. Die Darstellung der Trocknungsgeschwindigkeit in Spannweiten von 75% und 50% Probenfeuchte erlaubt den grafischen Vergleich unterschiedlicher Proben, da sich in dem Trocknungsabschnitt zwischen 75% und 50% rel. Materialfeuchte erfahrungsgemäß die größten Geschwindigkeitsdifferenzen zeigen. Je größer die Spannweite ausfällt, desto stärker nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit in diesem Abschnitt parallel zu der geringer werdenden Probenfeuchte ab.
Wie auch in den vorangegangenen Untersuchungen lassen sich auch hier neben dem Einfluss der Beschichtungsart deutliche Abhängigkeiten vom Bindemittel/Zuschlagverhältnis des jeweiligen Trägerputzes feststellen. Der Darstellung in Abbildung 73 ist zu entnehmen, daß die Trocknungsgeschwindigkeit der beschichteten bindemittelreichen Putze I und II (B/Z-Verhältnis von 1:2) niedriger ausfällt als die Trocknungsgeschwindigkeit der bindemittelärmeren Putze III und IV (B/Z-Verhältnis von 1:5).

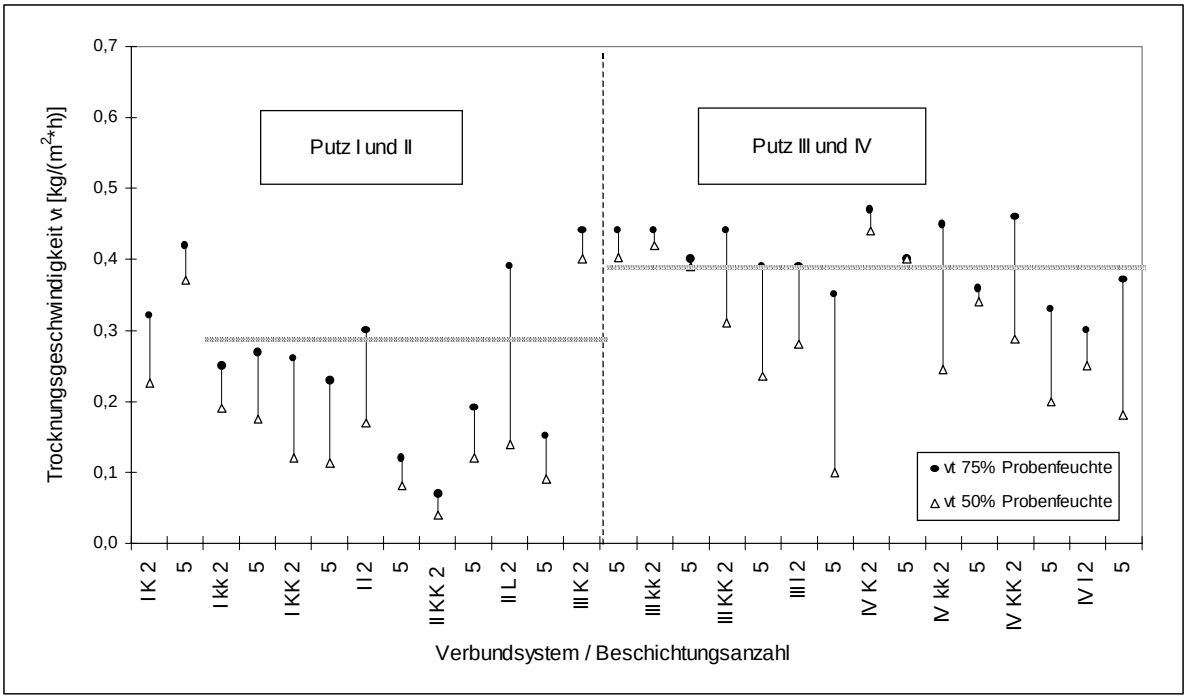


Abb. 73: Änderung der Trocknungsgeschwindigkeit von 75% zu 50% Probenfeuchte nach der zweiten und der fünften Beschichtung am Beispiel unterschiedlicher Verbundsysteme.

Die Art der Beschichtung scheint sich erst sekundär auf die Höhe der Trocknungsgeschwindigkeit auszuwirken. Der Verlauf der Trocknungskurven gibt Auskunft über das Trocknungsverhalten des Verbundsystems und die Trocknungsgeschwindigkeit über den gesamten Bereich der Trocknung. Mit sinkender Trocknungsgeschwindigkeit über den gesamten Feuchtebereich der Probe geht die Kurvenform von konvex über linear zu konkav über. Erwartungsgemäß zeigen Verbundsysteme mit durchlässigen Beschichtungen (reiner Kalkfarbe und Kalk-Kaseinfarben mit geringem Kaseingehalt) höhere Trocknungsgeschwindigkeiten als Verbundsysteme mit dichteren Beschichtungen (Kalk-Emulsionen).
Unter den getesteten Verbundsystemen lassen sich folgende Verhältnisse der Trocknungsgeschwindigkeit festhalten:

bezogen auf das Trägersystem $v_{t\,(Träger)}$: $PIII \geq PIV > PVIII > (PVII) > PI \geq PII$
(bezogen auf die Zusammensetzung: B/Z=1:2 < B/Z=1:5)

bezogen auf das Beschichtungsystem $v_{t\,(Beschicht.)}$: $K \geq kk \geq KK > l \geq L$.

In den Abbildungen 74 und 75 wird veranschaulicht, wie durch eine Mehrfachbeschichtung mit Kalk-Emulsionen mit hohem (L) und geringem (l) Gehalt an Leinöl die Trocknungsgeschwindigkeit erniedrigt wird.

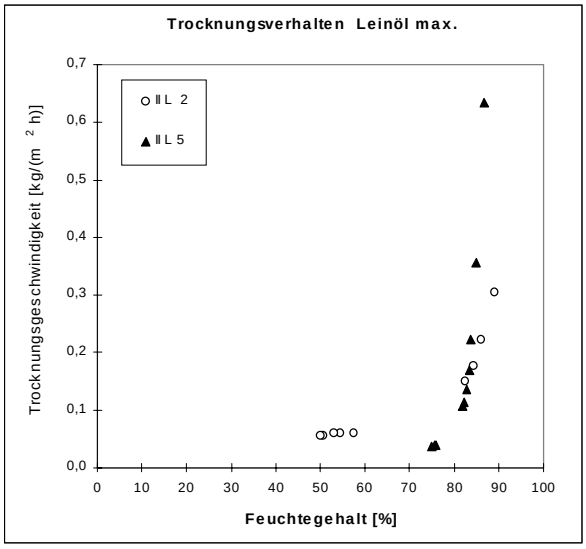


Abb. 74: Typisch konkaver Kurvenverlauf der stark abnehmenden Trocknungsgeschwindigkeit eines Verbundsystems mit einer dichten Beschichtung.

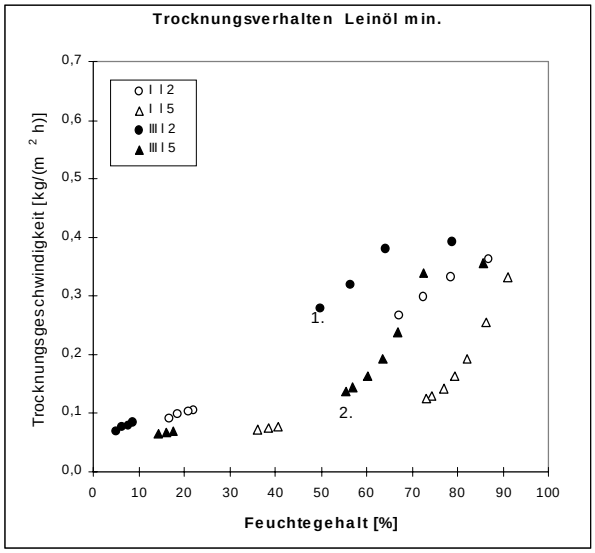


Abb. 75: Mit einer Verdichtung der Oberfläche nach der fünften Beschichtung geht der vorher fast lineare Kurvenverlauf (1.) der Trocknungskurve in einen konkaven Verlauf (2.) über.

In Abbildung 75 läßt sich die Veränderung der Kurvenform mit zunehmender Verdichtung nachvollziehen: Die nahezu linear abnehmende Trocknungskurve (Kreissymbole) der zweiten Beschichtungsfolge geht aufgrund der zunehmenden Verdichtung nach der fünften Beschichtung (Dreieckssymbole) in einen konkaven Verlauf über.

An dieser Darstellung wird zusätzlich die bereits beschriebene Abhängigkeit von der Trägerzusammensetzung klar. Der mit Kalk-Emulsion beschichtete bindemittelreiche Putz I weist geringere Trocknungsgeschwindigkeiten auf als der entsprechend beschichtete bindemittelärmere Putz III (Abbildung 75).

Konsequent konvexe Trocknungskurven erhält man in der Regel durch offene Beschichtungen (reine Kalkfarbe und Kalk-Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt) auf Trägern mit einem geringeren Bindemittel/Zuschlagverhältnis (B/Z-Verhältnis = 1:5; PIII-PVIII), wie beispielsweise dem kalkbeschichteten Putz III in Abbildung 76. Die offene Beschichtung auf dem bindemittelreicherem Putz I führt nur zu einem fast linearem Trocknungsverlauf. Die Sieblinie des Zuschlags ist bei beiden Trägern identisch.

Ein etwas dichteres Beschichtungssystem (Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Gehalt an Kasein = offener als die Kalk-Emulsion (I)) führt bei bindemittereichen Trägern zu Trocknungskurven mit konkaven Verlauf; auf einer bindemittelärmeren Variante jedoch zu einem konvexem Verlauf.

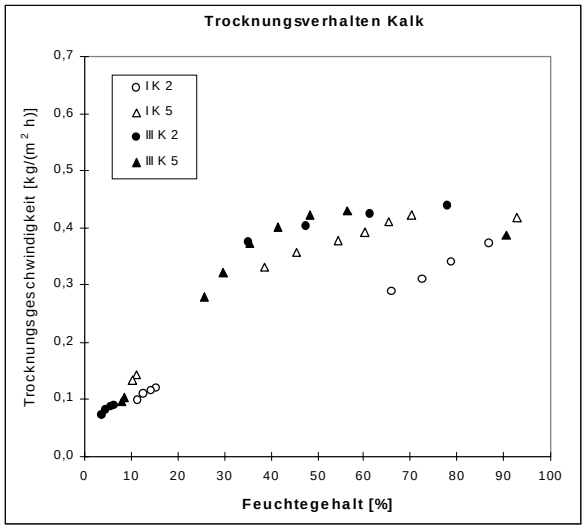


Abb. 76: Konvexe bis lineare Trocknungskurvencharakteristik von Verbundsystemen mit offener Beschichtung auf einem grobkörnigen Putz.

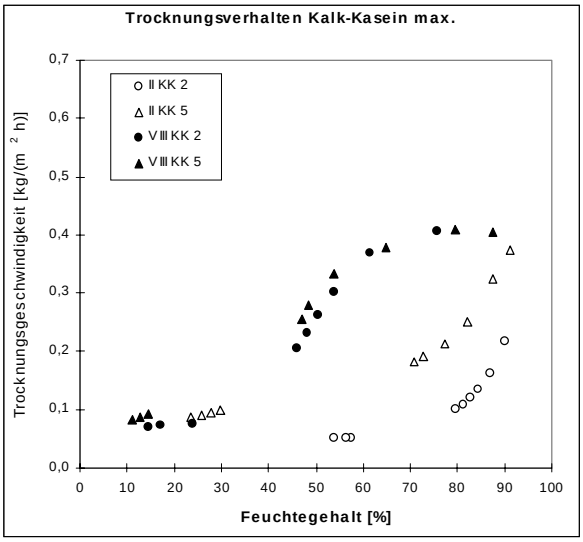


Abb. 77: Die Verwendung von Sumpfkalk als Bindemittel des Trägers hat keinen sichtbaren Einfluss auf den Kurvenverlauf eines offenen Systems.

Die Trocknungsgeschwindigkeit der Verbundsysteme in Abbildung 76 und 77 nimmt von PIII k über PVIII KK nach PI K und PII KK ab. Dementsprechend verändert sich die Kurvenform des Trocknungsverlaufs von langgezogen konvex, gestaucht konvex über annähernd linear bis konkav.

Das bedeutet, je nach Art des Beschichtungssystems, bzw. der Verdichtung der Putzoberfläche zeigen die Trocknungskurven der Verbundsysteme in weiterer Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Trägers einen charakteristischen Verlauf:

- Verbundsysteme mit einer dichten Beschichtung, wie beispielsweise der Kalk-Emulsion mit hohem Leinölgehalt lassen einen konkaven Kurvenverlauf im zweiten Trocknungsabschnitt erkennen (Abbildung 74). Das heißt, die Trocknungsgeschwindigkeit geht mit abnehmender Probenfeuchte stark zurück.[40]
- Im Gegensatz dazu zeichnen sich Verbundsysteme mit offenen Beschichtungen durch einen nahezu linearen bis hin zu einem konvexen Kurvenverlauf aus. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt mit sinkender Probenfeuchte relativ langsam ab. (Abbildung 76)[41].
- Die Trocknungskurven von Verbundsystemen mit Beschichtungen, die im

[40] konkaver Kurvenverlauf: im Trocknungsverlauf abnehmende Steigung

[41] konvexer Kurvenverlauf: im Trocknungsverlauf zunehmende Steigung

mittleren Bereich liegen (Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt), variieren im Verlauf je nach Träger von linear bis konkav (Abbildung 77).

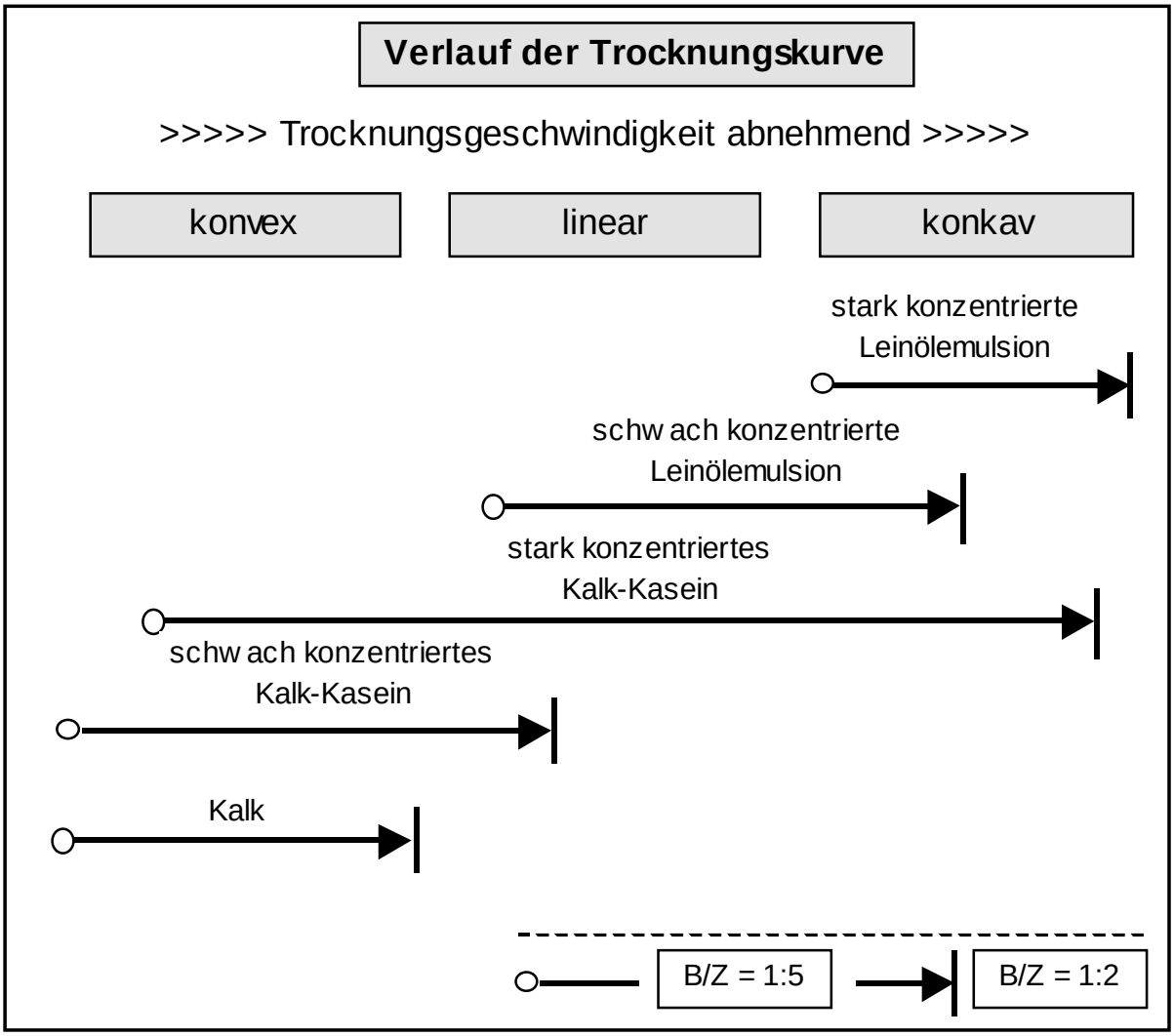
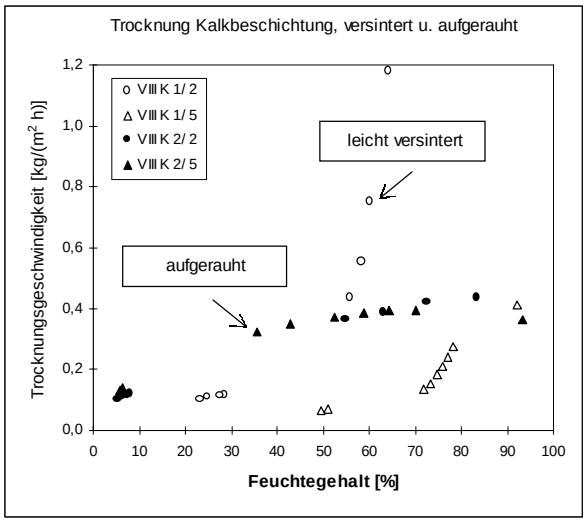


Abb. 78: Zusammenhang vun Trocknungsgeschwindigkeit und Kurvenform in Abhängigkeit vom Beschichtungssystem und der Trägerzusammensetzung.

Dabei ist das B/Z-Verhältnis des Trägers verantwortlich für die durchschnittliche Trocknungsgeschwindigkeit (Größenverhältnis der Trocknungskurve), während die Art der Beschichtung in erster Linie den Verlauf der Trocknung (Kurvenform) beeinflusst. In Abbildung 78 sind die Trocknungsverläufe der Verbundsysteme in Abhängigkeit vom Beschichtungssystem und der Trägerzusammensetzung schematisch dargestellt.

Versinterungen an der Trägeroberfläche beeinflussen die Trocknungsgeschwindigkeit des späteren Verbundsystems deutlich. In Abbildung 79b sind die w-Werte von mehrfach mit Kalkfarbe beschichteten beide Proben zu erkennen. Probe VIII K 1 ist leicht versintert, die w-Werte nach der zweiten und fünften Beschichtung

unterscheiden sich kaum voneinander. Sie liegen jedoch im Vergleich zu der vor der ersten Beschichtung aufgerauhten Probe VIII K 2 deutlich niedriger. Bei der Betrachtung des Trocknungsverhaltens der Probe VIII K 1 in Abbildung 79a fällt das extreme Absinken der Trocknungsgeschwindigkeit nach der zweiten Beschichtung auf. Die anfänglich sehr hohe Trocknungsgeschwindigkeit nimmt zwischen 50% und 60% Probenfeuchte stark ab. Nach der fünften Beschichtung mit reiner Kalkfarbe ist scheinbar eine deutliche Verdichtung erreicht, da der Kurvenverlauf der Trocknungskurve eines kalkemulsionsbeschichteten Systems ähnlich wird. Die Trocknungskurven der Probe VIII K 2 nach der zweiten und fünften Beschichtung zeigen hingegen den erwartungsgemäß konvexen Verlauf eines mit reiner Kalkfarbe beschichteten Putzsystems.



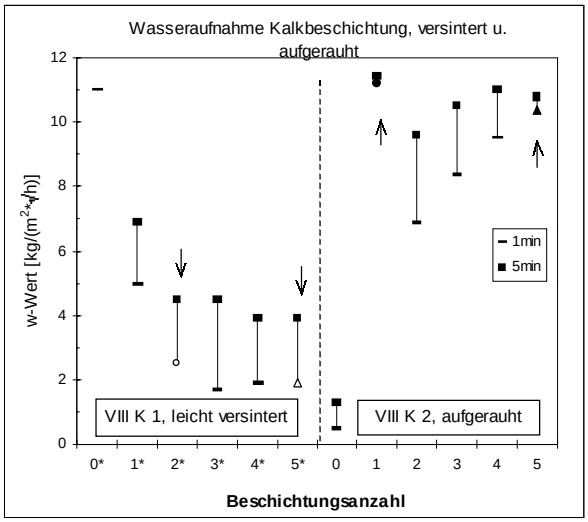


Abb. 79a und b: Vergleich von Trocknungsverhalten und Wasseraufnahme einer versinterten und einer oberflächlich aufgerauhten Probe des kalkbeschichteten Putzsystems VIII d.

Das führt zu dem Ergebnis, daß:

- bei Probe VIII K 2 das Aufrauhen einer stärker versinterten Oberfläche die Wasseraufnahme nach der ersten Beschichtung stark ansteigen läßt, die folgenden w-Werte jedoch ebenso wie die Trocknungsgeschwindigkeit nach der zweiten und fünften Beschichtung in dem Bereich vergleichbarer kalkbeschichteter Systeme liegt (vergl. Abbildung 79a und b).
- bei Probe VIII K 1 bereits eine leichte Versinterung einen deutlichen Einfluss auf den Trocknungsverlauf hat. Weitere Beschichtungen führen zu einer Verdichtung, die in erster Linie die Trocknungsgeschwindigkeit noch stärker herabsetzt. Die kapillare Wasseraufnahme ist gehemmt, weitere Beschichtungen bewirken jedoch keine Verringerung des w-Wertes.

4.4 Zusammenfassung

Die Mehrfach-Beschichtung von Kalkputzen mit fünf auf Kalk basierenden Rezepturen hat allgemein eine zunehmende Verdichtung der Probenoberfläche zufolge. Je nach Art des Beschichtungssystems bzw. des Gehalts der Zusätze Kasein und Leinöl werden die feuchtetechnischen Eigenschaften des Verbundsystems unterschiedlich stark beeinflusst. Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand der Verbundsysteme nimmt allgemein mit steigender Beschichtungsanzahl zu, der Wasseraufnahmekoeffizient sowie die Trocknungsgeschwindigkeit nehmen ab.

Der Einfluss der **Beschichtungsart** auf die feuchtetechnischen Eigenschaften der Verbundsysteme wird von Kalk-Emulsion mit einem hohen Anteil an Leinöl über die Kalk-Emulsion mit geringem Leinölgehalt, der Kaseinfarbe mit geringem Kaseingehalt bis zur Beschichtung mit reinem Kalk kleiner. Die Verbundsysteme mit der Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt müssen gesondert betrachtet werden, da eine Mehrfachbeschichtung infolge wachsender Spannungen zu feuchtetechnisch wirksamen Oberflächenproblemen führt (Risse, Ablösungen).

Die Ausprägung feuchtetechnischer Eigenschaften innerhalb eines Beschichtungssystems hängt stark von den jeweiligen Zusammensetzungen und den Carbonatisierungsbedingungen der Trägerputze ab. Dabei spielt die **Körnung** des Putzes eine wesentliche Rolle:

- Beschichtete feinkörnige Kalkputze zeigen innerhalb einer Beschichtungsart aufgrund des höheren Anteils an Kapillarporen (vergl. Kapitel 4.2.1.4, Abbildung 48) etwas niedrigere Wasserdampf-Diffusionswiderstände als grobkörnige Putze mit gleichem B/Z-Verhältnis (Putze I, III, VII).
- Die Untersuchung der kapillaren Wasseraufnahme führt zu dem überraschenden Ergebnis, daß die beschichteten Kalkputze mit grobkörniger Sieblinie trotz des geringeren Kapillarporenanteils innerhalb einer Beschichtungsart höhere w-Werte aufweisen, als die in gleicher Weise beschichteten Kalkputze mit äquivalentem B/Z-Verhältnis, jedoch feinkörnigem Zuschlag. Dies trifft in unterschiedlicher Intensität auf alle Beschichtungsarten zu.
- In den Trocknungseigenschaften der Prüfkörper zeigen sich ähnliche Abhängigkeiten wie beim kapillaren Saugverhalten. Die Trocknungsgeschwindigkeit der grobkörnigen Träger die mit Kalk-Kaseinfarbe mit hohem Kaseingehalt beschichtet wurden, ist höher als die der feinkörnigen Träger gleicher Beschichtungsart (I KK> II KK, III KK > IV KK). Eine Ausnahme bilden zwei Proben mit

Kalkfarbe (III K < IV K).

Das **Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis** eines beschichteten Kalkputzes zeigt ebenso einen Einfluss auf die Ausprägung der feuchtetechnischen Eigenschaften.

- Bindemittelreiche Kalkputze (B/Z-Verhältnis = 1:2) zeigen bei allen feuchtetechnischen Prüfungen im Verbund mit den verwendeten Beschichtungen undurchlässigere Eigenschaften als Kalkputze mit einem geringeren Bindemittelanteil (B/Z-Verhältnis = 1:5).
- Diese undurchlässigeren Eigenschaften gehen innerhalb einer Beschichtungsart einher mit einem erhöhtem Wasserdampf-Diffusionswiderstand (steht im Einklang mit den Ergebnissen von BÖTTGER & KNÖFEL 1996 / Untersuchungen an unbeschichteten Kalkputzen), geringerer kapillaren Wasseraufnahme und etwas schlechteren Trocknungseigenschaften.

Die **Carbonatisierungsbedingungen** spielen insgesamt eine große Rolle:

- Die Verbundsysteme deren Träger während der Carbonatisierung anfänglich mit CO_2 gespült und weitergehend befeuchtet wurden (Serie a), zeigen bei den hygrischen Prüfungen Reaktionen, die auf eine größere Verdichtung des Putzgefüges schließen lassen im Vergleich zu den Verbundsystemen, deren Träger ausschließlich unter Laboratmosphäre carbonatisierten (Serie d).
- Die w-Werte der Verbundsysteme mit den Putzen der Serie a liegen dadurch deutlich niedriger als die der Serie d.
- Dementsprechend weisen die Verbundsysteme der Serie a ebenfalls deutlich niedrigere Trocknungsgeschwindigkeiten auf.

Bereits leichte **Versinterungen** an der Trägeroberfläche beeinflussen die Trocknungsgeschwindigkeit eines späteren Verbundsystems deutlich.

- Mit folgender Beschichtungsanzahl wird die Trocknungsgeschwindigkeit weiter herabgesetzt.
- Die kapillare Wasseraufnahme des Verbundsystems ist ebenfalls niedriger als bei nicht versinterten vergleichbaren Verbundsystemen, wird durch nachfolgende Beschichtungen jedoch nicht im vergleichbaren Maß wie die Trocknungsgeschwindigkeit beeinflusst.

Nicht vollständig carbonatisierte Proben können, vor allem während der mehrfach durchgeführten Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme und Trocknung über mehrere Beschichtungszyklen hinweg, durch den Wassertransport zu Verdunstungsoberfläche restliches gelöstes $Ca(OH)_2$ dort anreichern. Dies macht

sich durch abweichende w-Werte im Vergleich zu ähnlichen Proben bemerkbar.

Unterschiedliche **Klimabedingungen** während der Konditionierung der Proben können Schwankungen in den Werten der kapillaren Wasseraufnahme hervorrufen. Dies gilt vor allen für Verbundsysteme, deren Beschichtungen in stärkerem Maß „quellende“ Zusätze enthalten (Leinöl, Kasein).

Eine **Trocknung** der Proben **bei 105°C** bewirkt eine Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme.

Je höher die kapillare Wasseraufnahme der untersuchten Verbundsysteme ist, desto stärker verwischen deren beschichtungs- und trägerabhängigen Eigenschaften, bzw. je dichter die Trägeroberfläche oder der Träger, desto stärker machen sich die beschichtungsspezifischen Auswirkungen bemerkbar.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die hygrischen Eigenschaften verschiedener, auf Kalk basierender Beschichtungssysteme geprüft. Im Vordergrund stand dabei der Vergleich von am Objekt gewonnenen Daten mit solchen Daten, die an Laborpräparaten ermittelt wurden. Das Hauptaugenmerk lag auf den hygrischen Eigenschaften, die von unterschiedlichen Rahmenbedingungen abhängig sind.
Im Vergleich aller Daten miteinander zeigt sich, daß die hygrischen Eigenschaften von dünnen Beschichtungen in erster Linie von der Zusammensetzung der Beschichtung abhängen. Der Untergrund und dessen Porenraum, sowie die Oberflächenbeschaffenheit des Beschichtungsuntergrundes gewinnt stärker an Einfluss, je durchlässiger und offenporiger die aufgetragenen Systeme werden. Im Falle von geprüften Putzuntergründen spielen das B/Z-Verhältnis, die Körnung und die Carbonatisierungsbedingungen eine große Rolle. Körperhafte Schlämmen hingegen können auch als offenporige Systeme den Untergrundeinfluss gut abschirmen.

Objektuntersuchungen Eilsum:
An der Außenwand der Kirche in Eilsum wurden verschiedene in erster Linie auf Kalk basierende Schlämmen appliziert, über einen längeren Zeitraum beobachtet und geprüft. Die dort gewonnenen Daten wurden mit an parallel dazu hergestellten Laborpräparaten verglichen.
Nach 2½ jähriger Beobachtungsdauer lassen sich deutliche Unterschiede in der Wirksamkeit und Beständigkeit der einzelnen Schlämmensysteme auf der historischen Ziegelfassade erkennen. Die Eigenschaften sind auch nach der Bewitterung grob drei Systemgruppen (**a.** körperhafte Schlämmen mit Opferschichtcharakter, **b.** Systeme mit Anstrichcharakter und **c.** wasserabweisend eingestellte Industrieprodukte) zuzuordnen.
Die *körperhaften Schlämmensysteme auf Kalkbasis* S1-S6 weisen nach 2½ jähriger Standzeit geringere Wasseraufnahmekoeffizienten auf als in frischem Zustand. Sie sind zwar kapillar aktiv, besitzen jedoch genügend Körper, um die wesentlich stärker saugenden Untergrundeinflüsse abzuschirmen. Die Schlämmen stellen zusätzlich eine Opferschicht dar, die in gewissem Rahmen Salz einlagern kann, eine schädliche Salzanreicherung an der originalen Ziegeloberfläche verhindert und langsam von außen zurückwittert. Die *Kalkschlämmen mit Anstrichcharakter* zeigen im frischen Zustand eine stärkere Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme als die körperhaften Schlämmen, verlieren diese

Eigenschaft im Laufe der Zeit jedoch völlig. Nach 2½ jähriger Bewitterungszeit ist kein Feuchteschutz mehr vorhanden. Das *Dispersions-Silikatsystem* läßt in seiner anfänglich hoch wasserabweisenden Eigenschaft nach und zeigt nach 2½ Jahren Verwitterung nur eine wasserhemmende Wirkung. Die gute Wasserabweisung der Schlämme aus *Siliconharzemulsion* im frischen Zustand ist auch nach 2½ Jahren fast unverändert vorhanden. Bei den zwei Industriesystemen wurden auf stark salzbelasteten Ziegeln teilweise Abplatzungen im Grenzbereich Schlämme und unbeschlämmter Ziegel beobachtet.
Alle Schlämmensysteme weisen bis auf das Siliconharzemulsions-System in frischem Zustand einen sehr geringen Wasserdampf-Diffusionswiderstand auf.
Über der Horizontalsperre ist die Trocknungsgeschwindigkeit der kapillar offenen, rein mineralischen Systeme hoch bis sehr hoch. Die von Restauratoren entwickelten Schlämmensysteme mit organischen Zusätzen zeigen etwa 10-fach geringere Trocknungsgeschwindigkeiten. Am stärksten behindert wird die Trocknung bei den beiden Industriesystemen.

Objektuntersuchungen Campen und Lüne:
Anhand der feuchtetechnischen Untersuchungen an den vielfachen Überdeckungen an der salz- und feuchtebelasteten Innenwand der Kirche in Campen wird mit Hilfe einer einfachen „Tröpfchenmethode“ verdeutlicht, in wieweit dichtere Anstrichsysteme in Mehrfachsystemen zur Veränderung der benachbarten Schichten führen können. Nach der stufenartigen Freilegung einer Testfläche und mehrmonatiger offener Standzeit haben sich die hygrischen Eigenschaften einzelner Schichten gravierend verändert. Die Wassereindringzeiten der benachbarten Tünchen steigen stufenförmig zu den bereits zu Anfang der Untersuchung wasserabweisenden Schichten an.
Im Fall des Wandabschnittes C der Ostwand Refektorium/Kloster Lüne sind die Schäden an den Wandmalereien aufgrund fehlender Feuchte- und Salzbelastungen auf einen rein malereispezifischen Bereich zu beschränken. Die Probleme sind auf zu spannungsreiche Überdeckungen zurückzuführen.

Feuchtetechnische Prüfungen an Testsystemen unter kontrollierten Bedingungen:
Die Mehrfach-Beschichtung von Kalkputzen, die sich in Zusammensetzung und Carbonatisierungsbedingungen unterscheiden, mit fünf auf Kalk basierenden Farbrezepturen hat allgemein eine zunehmende Verdichtung der Probenoberfläche zufolge. Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand der im Labor getesteten Verbundsysteme nimmt allgemein mit steigender Beschichtungsanzahl zu, der

Wasseraufnahmekoeffizient, sowie die Trocknungsgeschwindigkeit nehmen ab. Im Falle der hier unter Laborbedingungen getesteten, auf Kalk als Hauptbindemittel basierenden Beschichtungen, macht sich die Trägerzusammensetzung bemerkbar. Je geringer die wasserabweisende Wirkung einer Beschichtung, desto stärker ist der Einfluss des Untergrundes zu erkennen. Die Substratabhängigkeit der Beschichtungen wird durch die Körnung, dem B/Z-Verhältnis und den Carbonatisierungsbedingungen des Trägers und gegebenenfalls entstandenen Versinterungen an der Trägeroberfläche bestimmt.

Anhand der Feuchtigkeits-Transportmechanismen läßt sich unterscheiden, wodurch die hygrischen Eigenschaften geprägt werden.

Feuchtetransport in erster Linie über die Gasphase: Die Wasserdampf-Diffusionswiderstände entsprechen den jeweiligen Porenradienverteilungen der Trägerputze. Ein hoher Porenanteil des Trägers geht mit einer größeren Wasserdampf-Durchlässigkeit des Verbundsystems einher.

Feuchtetechnische Eigenschaften, die zum Teil oder ganz auf kapillaren Transporterscheinungen beruhen, weichen hiervon ab.

Diffusiver und kapillarer Feuchtetransport: Während der Trocknung zeigen die beschichteten Putzträger mit den geringeren Kapillarporenanteilen im zweiten Trocknungsabschnitt höhere Trocknungsgeschwindigkeiten als die beschichteten Putze mit den höheren Kapillarporenanteilen.

Rein kapillarer Feuchtetransport: Die Untersuchung der kapillaren Wasseraufnahme führt zu dem überraschenden Ergebnis, daß alle beschichteten Kalkputze mit grober Sieblinie trotz geringerer Kapillarporenanteile höhere w-Werte aufweisen, als Kalkputze mit äquivalentem B/Z-Verhältnis und feiner Sieblinie.

6 Diskussion

Ein Vergleich der an Objekten gewonnenen hygrischen Daten mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen an Modellpräparaten ermöglicht die Zuordnung der substratabhängigen Eigenschaften von Beschichtungen.

Die Substratabhängigkeit von dünnen auf Kalk basierenden Beschichtungen wird durch die Sieblinie, dem Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis und den Carbonatisierungsbedingungen des Trägers, bzw. gegebenenfalls entstandenen Versinterungen an der Trägeroberfläche bestimmt; im übertragenden Sinne also durch die Ausprägung des Porenraumes und der Oberfläche des Beschichtungsuntergrundes. Die anhand der Feuchtigkeits-Transportmechanismen zu differenzierenden hygrischen Eigenschaften folgen innerhalb einer Beschichtungsart nicht nur allein der Ausprägung des Porenraumes des Trägers. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstände entsprechen den jeweiligen Porenradienverteilungen der Trägerputze; ein hoher Porenanteil des Trägers geht einher mit einer größeren Wasserdampf-Durchlässigkeit des Verbundsystems. Sobald jedoch hygrische Eigenschaften geprüft werden, an denen nicht nur diffusive sondern auch kapillare Transportmechanismen beteiligt sind, scheint insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit der Untergründe eine tragende Rolle zu spielen (Trocknungsverhalten und kapillare Wasseraufnahme). Die Ursache dieses abweichenden hygrischen Verhaltens der Verbundsysteme vom Verhältnis der Porenradienverteilungen der Träger ist vermutlich in der kapillaren Grenzschichtüberschreitung vom Träger zur Beschichtung zu suchen. Eine mögliche Erklärung wäre dafür eine bessere Haftung einer auf Kalk basierenden Beschichtung auf einem, durch feinkörnigeren Zuschlag homogeneren Untergrund. Da vor allem spannungsreiche Beschichtungen z.B. auf Kalk-Kaseinbasis die größten feuchtetechnischen Unterschiede zwischen fein- und grobkörnigen Trägermaterialien zeigen, ist zu vermuten, daß durch die gleichmäßigere Bindemittelverteilung der feinkörnigen Putze an der Oberfläche weniger Fehlstellen, wie Risse, Spannungen und Ablösungen, im Kontaktbereich Träger/Beschichtung induziert werden.

Bei dickeren Kalk-Beschichtungen (körperhaften Schlämmen und Putze) muß man aufgrund von Festigungs- und Carbonatisierungsvorgängen den Einfluss des Untergrundes aus zweierlei Sicht betrachten: Erstens wird die Ausbildung des Porenraumes, sowie die Carbonatisierungsgeschwindigkeit wesentlich durch den Restwassergehalt der Beschichtung beeinflusst. Dieser wird unter anderem durch das Saugverhalten des offenen Porenraums des Untergrundes bestimmt (DOMINIK & TANDINA 1996). Durch gezieltes Vornässen oder zusätzliche Wasserzugabe zur

Beschichtungsrezeptur läßt sich darauf Einfluss nehmen. In diesem Fall spielt der Untergrund eine wichtige Rolle. Hat die Beschichtung abgebunden und ist durchcarbonatisiert, läßt sich im Vergleich zu dünnen, auf Kalk basierenden Systemen der Einfluss des Untergrundes jedoch stark vernachlässigen.
Im Fall der im Rahmen dieser Arbeit getesteten Schlämmen lassen sich nach 2½ jähriger Beobachtungsdauer deutliche Unterschiede in der Wirksamkeit und Beständigkeit der einzelnen Schlämmensysteme auf der historischen Ziegelfassade erkennen. Aus den gewonnenen Daten lassen sich Rückschlüsse auf den jeweiligen Anwendungsbereich ziehen: In problematischen Zonen, wie beispielsweise dem Sockel der Kirche in Eilsum, sind vor allem die körperhaften, salzspeicherfähigen Kalk-Systeme (mit geringen hydraulischen Anteilen) vorzuziehen. Der höhere Pflegeaufwand geht mit dem sicheren Erhalt der historischen Substanz einher. Gemessen an der Wasseraufnahme der originalen Ziegeloberfläche wird die eindringende Feuchtigkeit bereits deutlich reduziert. Die Wasseraufnahme kann im Laufe der Zeit durch Salzablagerungen, fortschreitender Carbonatisierung und primäre Gipsbildung über die Einengung des Porenraumes noch etwas abnehmen. Im Falle eines geringer- bis unbelasteten Untergrundes wäre eine längere Standzeit zu erwarten. BÖTTGER 1997 berichtet von Kalkmörteltestflächen auf historischen Kalkmörteln, die sich nach 6 Jahren Standzeit noch unverändert darstellen. Allerdings dürfen die Zuschlaganteile im Verhältnis zur Bindemittelmenge nicht zu hoch sein, da die Beschichtung dann, wie hier im Fall der dick aufgetragenen ‚Opferschlämme' mit Traßkalk, zu schnell absanden (GÖDICKE-DETTMERING 1997). Durch die deutlich verkürzten Standzeiten verliert die Beschichtung bald die Funktion der ‚Opferschicht'. Die auf reinem Kalk und Kalk mit hydraulischen Zusätzen basierenden Schlämmen mit Anstrichcharakter zeigen selbst auf relativ gering salzbelasteten Ziegeln nach der Bewitterung einen relativ hohen w-Wert auf, welcher mit zunehmender Dauer des kapillaren Saugens bis hin zu den Werten des ungeschützten offenen Ziegels ansteigt. So ist keine wasserhemmende Wirkung vorhanden. Da das Verhalten verwitterungsbedingt ist, werden diese Schlämmensysteme einem Feuchteschutz im weiteren Sinne nicht gerecht. Nach den Versuchen von HUBRICH & GORETZKI 1999 läßt sich die Witterungsbeständigkeit von dünnen Kalkbeschichtungen auf Gipskalkputzen auch durch natürliche und synthetische Zusätze (Kasein, Kasein-Tempera und Dispersion) nicht verbessern. Die Verwendung geeigneter Haftvermittler sowie die anschließende Hydrophobierung mit Schmierseife wirkt sich jedoch positiv auf die Witterungsbeständigkeit aus. Steht nicht der historische Befund oder eine materialgetreue Sanierung des Mauerwerks im Vordergrund, sondern in erster

Linie der Schutz vor eindringender Feuchtigkeit, stellen moderne Systeme (wasserabweisend eingestellte Systeme auf Kaliwasserglas und Silikonharzbasis) bei relativ geringer Salzbelastung eine wirksame und relativ wartungsarme Alternative dar. Bei höheren Salzgehalten im Mauerwerk können jedoch Probleme durch sich unter der Schlämme anreichernde Salze entstehen (Abplatzungen und weitere Schädigung der originalen Oberfläche), da direkt an der Grenzfläche Ziegel/Schlämme der kapillare salzbefrachtete Wassertransport endet und eine Austrocknung nur noch über diffusivem Weg erfolgen kann. FRANKE et al. 1995 zeigen in ihren Versuchen, daß auch an Fehlstellen in wasserabweisenden Beschichtungen bevorzugte Verdunstungsbereiche liegen und sich infolge dessen dort verstärkt ausblühfähige Salze anreichern. Über die kapillar offenen Beschichtungen gelangt zwar mehr Feuchtigkeit ins Mauerwerk (je nach hydrophober Einstellung auch weniger) als über nicht kapillar aktive Systeme. Im Gegensatz dazu wird allerdings die Trocknungsgeschwindigkeit der kapillar aktiven Systeme in der zweiten Trocknungsphase entscheidend durch den kapillaren Wassertransport bestimmt (KRISCHER 1992). Im Zuge der Trocknung verhindert ein durchgehender kapillarer Feuchtetransport zur Schlämmenoberfläche Salzanreicherungen direkt unter Schlämme. Bei der Beurteilung der hygrischen Eigenschaften einer kapillar offenen Beschichtung darf nicht nur die Wasserdampf-Durchlässigkeit der kapillaren Wasseraufnahme gegenübergestellt werden, sondern es muß zusätzlich das Trocknungsverhalten betrachtet werden.

Durch die feuchtetechnischen Untersuchungen an der Innenwand der Kirche in Campen wird deutlich in wieweit dichtere Anstrichsysteme zur Veränderung der benachbarten Schichten führen können. In den meisten Fällen lassen sich an der Tünchesichtfolge in den Bereichen mit positiven organischem Bindemittelnachweis oder in direkter Nachbarschaft dazu, deutlich höhere Wassereindringzeiten beobachten als an reinen Kalktüncheschichten. Nach mehrmonatiger offener Standzeit zeigt sich, daß sich bei Änderungen im Gesamtsystem „Schichtverbund“ eine gravierende Dynamik entwickeln kann. Die veränderten Wassereindringzeiten der umliegenden Tünchen steigen stufenförmig zu den bereits zu Anfang der Untersuchung wasserabweisenden Schichten an. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen in diesen Zonen dichte Kalk-, bzw. Gips-Sinterschichten. Um diese Verdichtungen herum fallen vermutlich bevorzugt transportierte Salze aus und führen so sukzessive zu einer weiteren Verdichtung. Diese Sinterschichten haben nicht nur vom Gesamtsystem abweichende feuchtetechnische Eigenschaften, sie unterscheiden sich auch in den mechanischen Kennwerten von den benachbarten, teilweise extrem weichen Schichten.

Im Falle von hohen Salzgehalten sollte man ohne den in Kapitel 3.2.4.1 beschriebenen Tröpfchen-Test in jedem Fall von einer Freilegung von Wandmalereien absehen. Da meistens jedoch unansehliche Wände, das Abplatzen und Abpudern der Oberfläche, sowie teilweise hygroskopische Feuchteflecken zu Maßnahmen drängen, sollte die Technik angewandt werden, die sich seit Jahrhunderten bewährt hat und zu den einfachsten „Konservierungsmaßnahmen“ zählt: Das Überarbeiten mit einer Kalktünche. Damit wird eine optische Beruhigung der geschädigten Wandpartien erzielt und man kann sicher sein, eine reversible und aus feuchtetechnischer Sicht unschädliche Beschichtung vorgenommen zu haben. TRAMPEDACH 1993 plädiert dafür, die Wandmalereien so lange wie möglich unter den nachfolgenden Bedeckungen zu belassen, erst die standortspezifischen Bedingungen auszuloten und einen Schwerpunkt auf die Erforschung geeigneter Erhaltungsmaßnahmen zu legen. Sie weist ausdrücklich auf den Vorteil (beispielsweise die Reversibilität) bei der Verwendung von reinem Kalk hin. Die öffentliche Präsentation der einzigartigen Kunstwerke sollte erst dann erfolgen, wenn geeignete und geprüfte Konservierungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. BAGLIONI et. al. 1997 empfiehlt bei Restaurierungsmaßnahmen von auf Kalk basierenden Wandmalereien, die Verwendung von zu Kalk kompatiblen Rezepturen. Das Material muß sich in Bezug auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften ähnlich verhalten wie die zu restaurierenden Malereischichten. Es werden Versuche vorgestellt, in denen Kalkrezepturen durch Zusätze, die zum Beispiel den Carbonatisierungsvorgang beschleunigen oder die Fließeigenschaften eines Hinterfüllmörtels verändern, weitere günstige Eigenschaften erlangen können. In Schweden wird allein aufgrund der positiven Erfahrungen mit Kalk als Baustoff unter der Kontrolle der Denkmalfachbehörden die Roh- und Fertigprodukte seit über 15 Jahren auch in industriellem Maßstab hergestellt und von Handwerksfirmen fachgerecht eingesetzt (SCHMIDT 1993).

Diese Arbeit zeigt jedoch, daß die Entwicklung der Eigenschaften dicker und dünner Beschichtungssysteme auf Kalkbasis im Laufe der Zeit vom Untergrund abhängig ist. Da mathematische Zusammenhänge noch nicht herzustellen sind (DOMINIK & TANDINA 1996), sollten vor umfangreichen Maßnahmen an Bauwerken mit in den Frage kommenden Beschichtungen grundsätzlich Testflächen angelegt werden. KÜNZEL & HOLZ 1991 stellen in ihrem Bericht einige bauphysikalische Grundlagen und generelle Zusammenhänge auf Grund von Langzeituntersuchungen an alter Bausubstanz vor.

Die Ansprüche an die zu verwendenden Systeme müssen in vernünftigem Maß mit dem Schutz, der geringst möglichen baulichen Veränderung, einer Verträglichkeit

mit den historischen Materialien und der Reversibilität der aufgetragenen Systeme korrelieren. Dabei darf man nicht nur die allgemein üblichen Anforderungen und Grenzwerte aus der modernen Baustoffforschung zugrunde legen. In den allgemeinen Normen für Baustoffprüfungen gelten die geforderten Werte beispielsweise für feuchtetechnische Eigenschaften von Anstrichen und Schutzbeschichtungen meist für unbelastete Systeme und sind am historischen Bauwerk unter Einbezug kultur- und baugeschichtlicher Aspekte nicht immer einzuhalten.
Die Forderung von KRUS 1995, die Wasserdampf-Diffusion aufgrund der im höheren Feuchtebereich auftretenden Einflüsse durch Effusion etc. nur nach dem Trockenbereichsverfahren (Dry Cup, siehe unter Kapitel 2.1.2) durchzuführen, ist nicht zu befürworten, wenn die Daten mit objektbezogenen Untersuchungen verglichen werden sollen. Die Lagerung bei 20 °C und 50% rel. Luftfeuchtigkeit der Prüfkörper bis zur Gewichtskonstanz wäre statt dessen empfehlenswert. Auf die vorherige Trocknung der zu prüfenden Körper bei 105 °C sollte aus dem gleichen Grund und zusätzlich aufgrund des nach der Trocknung abweichenden kapillaren Saugverhaltens verzichtet werden (Kapitel 4.3.2.4). SOMMER 1971 und KRISCHER 1992 beschreiben eine unterschiedliche Benetzbarkeit von Glaskapillaren vor und nach der Trocknung bei 105 °C, die auf eine veränderte Grenzflächenspannung zurückgeführt wird. Die Größe der Grenzflächenspannung kann also nicht vereinfacht nur als Materialkonstante zwischen den beiden Grenzflächenmaterialien betrachtet werden, sondern hängt auch von an der Feststoffoberfläche adsorbierten Molekülen diesseits und jenseits der Grenzfläche ab. (Die Grenzflächenspannung wird als zwischen zwei Grenzflächen auftretende Kraft pro Länge, senkrecht durch den Schnitt dieser Grenzfläche, in einer sehr dünnen Schicht von wenigen Molekülen bezeichnet, bzw. die Energie, die frei wird, wenn die Grenzfläche sich verkleinert, LUTZ et al. 1985). Das heißt, eine absolut trockene Glas-/Putz- oder Beschichtungskapillaroberfläche verursacht eine andere Grenzflächenspannung als die entsprechende Kapillare mit einem durch Adsorption von Wassermolekülen aus der Luftfeuchte geschlossenem Feuchtefilm an der Oberfläche. Die Wiederbenetzung der Kapillare nach der Trocknung bei den Versuchen von SOMMER 1971 verläuft irreversibel unter einem kleineren Randwinkel, der jedoch mit steigender Trocknungsdauer wieder zunimmt. Da selbst nach 105,5 Std. Trocknungsdauer kein eindeutiger Beharrungszustand festgestellt wurde, wird das Verhalten auch, wie in dieser Arbeit, auf eine Veränderung der Kapillar-Oberfläche durch den Trocknungsvorgang zurückgeführt.
Zum Schluß muß noch einmal darauf hingewiesen werden, daß alle feuchtetechnischen Prüfungen an Laborproben unter, für den Prüfzweck klimatisch relevanten

und vor allem gleichbleibenden Klimabedingungen und Vorkonditionierungen durchgeführt werden sollten. Die in DIN 52 617 geforderte Trocknung der Prüfkörper bei 105°C hat, wie in Kapitel 4.3.2.4 ersichtlich und auch von HOLM et al. 1999 beschrieben, einen starken Einfluss auf die jeweilige kapillare Wasseraufnahme. Im Gegensatz zu den genannten Autoren wird allerdings in dieser Arbeit von einer veränderten Benetzbarkeit der Porenwände ausgegangen und nicht von einer Quellung der Poren.

7 Ausblick

Da der Feuchtehaushalt einer Außenwand bis auf Ausnahmen (z.B. aufsteigende Mauerfeuchtigkeit, hygroskopische Salze) über die Beschichtung reguliert wird, ist es nicht immer sinnvoll, die Wasserdampf-Durchlässigkeit der kapillaren Wasseraufnahme gegenüberzustellen.
Die Fassadenschutztheorie nach KÜNZEL 1969, besagt, daß bei der Überschreitung des durch die Funktion w ∗ sd < 0,1 kg/(m∗√h) (Bild 80) gegebenen Grenzwertes nach wiederholter Feuchtigkeitsbelastung eingedrungenes Wasser nicht mehr abgegeben werden kann. Nach dieser Theorie wird die Wasserdampf-Diffusion als wesentlicher Trocknungsmechanismus (vor allem für kunstharzgebundene Beschichtungssysteme) betrachtet.

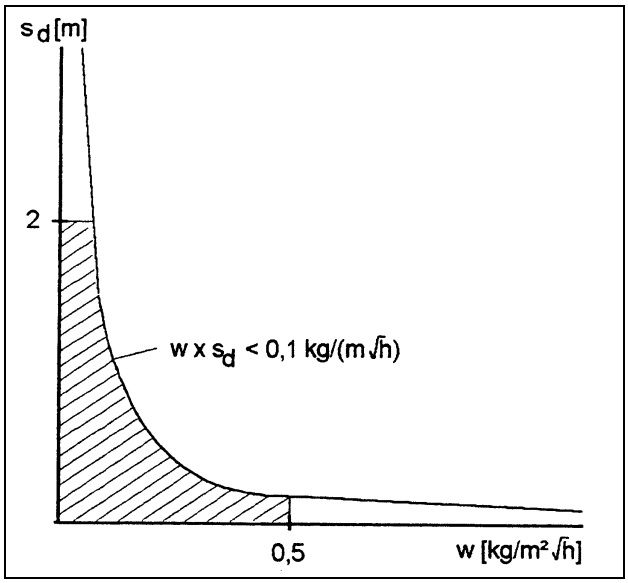


Bild 80: Grafische Darstellung der Fassadenschutztheorie nach KÜNZEL.

Dies kann aber nicht auf bedingt kapillar offene, auf Kalk basierende Systeme, wie sie im Fall der Denkmalpflege gerne verwendet werden, übertragen werden. In diesem Fall müssen bei der Betrachtung des Verhältnisses von eindringender Feuchtigkeit zu austretender Feuchtigkeit beide Trocknungsmechanismen (den gasförmigen sowie die kapillaren) der kapillaren Wasseraufnahme gegenübergestellt werden. Nach BAGDA 1981 ist die Austrocknungsgeschwindigkeit der mit Feuchtigkeit belasteten Untergründe in erster Linie von der aufgenommenen Wassermenge abhängig und nicht nur vom s_d-Wert der Beschichtung. In der allgemeinen Darstellung der Trocknungsgeschwindigkeit werden alternativ zum

s_d-Wert beide Feuchtetransport-Mechanismen erfaßt. Am Beispiel der Trocknungswerte geprüfter Schlämmensysteme läßt sich bestätigen, daß die rein diffusive Trocknung wasserabweisender Industriesysteme deutlich langsamer verläuft als die kapillar unterstützte Trocknung von porösen Beschichtungssystemen, die nicht hydrophob eingestellt sind. Da hierfür noch keine ausführlichen Werte existieren, müssten systematische Laboruntersuchungen durchgeführt werden, die im Sinne der Fassadenschutztheorie von KÜNZEL helfen, die bisherigen Grenzwerte um Grenzwerte für kapillar offenere Systeme zu erweitern. Ein am ibac der RWTH Aachen entwickeltes neues Verfahren führt bereits in diese Richtung. Anhand des sogenannten WDL-Verfahrens (Wasserdurchlaßverfahren) geht man von rückseitig kapillar durchfeuchteten (gesättigten) Prüfkörpern aus, an welchen der Diffusionsstrom gemessen wird. Wie bereits in der Veröffentlichung von BLÖCHL et al. 1996 betont, verlangt auch PLEYERS 1999 a) eine neue Betrachtung der Anforderungen an Beschichtungen (in diesem Fall Natursteinhydrophobierungen). Bislang wurden diese Anforderungen nur nach den anhand der WDD ermittelten Werte beurteilt.

Desweiteren wären detailliertere Untersuchungen zur kapillaren Grenzschichtüberschreitung vom Träger zur Beschichtung speziell in Kalksystemen, bzw. Haftungsmechanismen zwischen den Schichten in Abhängigkeit von der Oberflächenmorphologie notwendig. Die Übergangswiderstände des Feuchtetransports bei einem Materialwechsel in mehrschichtigen Materialien wurden bereits von KIEßL 1983 und KRUS 1995 und anderen ausführlich untersucht. Laut BEDNAR et al. 1999 können anhand moderner Simulationsprogramme bei der Kenntnis der genauen Übergangswiderstände der verwendeten Materialien die sich nach Maßnahmen einstellende Feuchtezustände ermittelt werden. Die Übergangswiderstände wären durch Aufsaug- und Trocknungsversuche zu bestimmen. Diese aufgestellten mathematischen Modelle gelten jedoch nur für unbelastete Systeme. Die Schwierigkeit besteht darin, beispielsweise unter wechselnder Salzbelastung verläßliche Voraussagen zu treffen.

8 Literaturverzeichnis

Arnold, A. (1984): Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung von Denkmälern. Arbeitsheft des Bayrischen Landesamts für Denkmalpflege Nr. 31, S. 152-162, Intern. Kolloquium München 21.-22.5.1984.

Arnold, A., Zehnder, K. (1989): Salt weathering on Monuments. The Conservation on Monuments in the Mediterean Basin, ed. F. Zezza, Bari, S. 31-58.

Arnold, A., Zehnder, K., Küng, A. & Emmenegger, O. (1991): Wandmalereizerfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Müstair. Zeitschrift f. Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 5, Heft 2, S. 171-200.

Autenrieth, H. & Turek, P. (1992): Historical and topical monitoring of medieval wallpaintings by example of Idensen (Germany). Proceedings of the Int. UNESCO-Symposion on architectural surfaces, Venice.

Autenrieth, H. & Turek, P. (1994): Erscheinungsbildanalyse, Mikro-Monitoring, Schadensdynamik. In: Segers-Glocke, C. (Hrsg): "Wandmalerei-Schäden", Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 11, S. 49-53.

Bagda, E., (1981): Bauphysikalische Aspekte zum Feuchteschutz von Außenputzen mit Beschichtungssystemen. IBK-Bauseminar Nr. 52 “Außenputze”.

Bagda, E. (1981): Der Feuchtehaushalt von Fassadenbeschichtungen. Farbe + Lack 91, Nr.1, S. 8-12.

Bagda E., (1988): Zum Feuchtehaushalt von Beschichtungsstoffen Teil 1. Die Wasserdampfdurchlässigkeit und die Bestimmung der Permeationskoeffizienten. Farbe und Lack 94 Nr.1, S. 15-18.

Baglioni, P., Dei, L., Piqué, F., Sarti, G., Ferroni, E. (1997): New autogenous lime-based grouts used in the conservation of lime-based wall paintings. Studies in Conservation 42, pp. 43-54.

Bednar, T., Dreyer, J., Breinesberger, M. (1999): Schlagregenschutz von Außenwänden – Auswirkungen historischer Putzsysteme auf die Perfomance der Wand. F. H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - „MSR‘99“ Technische Akademie Esslingen Nov. / Dez. 1999. Bd. 2, S. 957-964.

Bläuer-Böhm, C., (1994): Salzuntersuchungen an Baudenkmälern. Zeitschr. f. Kunsttechnol. und Konserv. 8, Heft 1, S. 86-103.

Blöchl, B. & Stadlbauer, E. (1995): Die ev. ref. Kirche in Campen/Ostfriesland: Naturwissenschaftlich-restauratorische Aspekte zur Erhaltung ihrer bedeutenden mittelalterlichen Wandmalereien. Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 15. Jahrgang, Heft 3/95, S. 100-104.

Blöchl, B., Rüenauver, M., Schlütter, F., Stadlbauer, E. (1996): Zur Beständigkeit und Schutzfunktion von Schlämmen auf historischem Mauerwerk am Beispiel der ev. ref. Kirche in Eilsum/Ostfriesland. F. H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), 4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. Technische Akademie Esslingen 17.-19. Dez. 1996. Bd. 1, S. 497-522.

Boenkendorf, U., Degenkolb, M., Knöfel, D. (1994): Einfluß von Proteinen auf technologische Eigenschaften von Kalkmörteln. Tagungsberichte 12. Internat. Baustofftagung (Ibausil), Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar – Universität, Band 3, S. 77-88.

Böttger, K.G.; Knöfel, D. (1994): Eigenschaften von Kalkputzen für historische Bauwerke auf Basis trocken gelöschter Kalkmörtel. Ibausil 2. Beiträge zur 12. Internationalen Baustofftagung Weimar, S. 17-30.

Böttger, K.G.; Knöfel, D. (1996): Vergleich der Eigenschaften von Kalkmörteln in Abhängigkeit vom verwendeten Bindemittel und Zuschlag. F. H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), Berichtsband zum 4.ten internationalen Kolloquium ‘Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen’, Technische Akademie Esslingen 17.-19. Dez. 1996, Band 2, S. 779-801.

Böttger, K.G. (1997): Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze. Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar.

Braams, J., Warscheid, T. (1993): Untersuchungsbericht des vom BMBF geförderten Projektes BAU 1015k, Eilsum. Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen an den Schlämmentestflächen an der ev.-ref. Kirche in Eilsum vom 19.-20.10.1993. ICBM, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.

Brandes, C., Stadlbauer E., (1995): Antrichsysteme auf Naturstein im Bewitterungstest. Bautenschutz und Bausanierung 4, S. 64-68.

Brandes, C. (1995): Natursteinkonservierung durch Beschichtung, Dissertation Universität Hannover.

Dietz, F. (1995): Wider besseres Wissen (!?): Zementmörtel und historische Bausubstanz, Bausanierung, Heft 3, S. 6-7.

DIN 1060: Teil 1, März 1995. Baukalk; Begriffe, Anforderungen, Lieferung, Überwachung.

DIN 50 008: Teil 1, Februar 1981. Konstantklimate über wässrigen Lösungen: Gesättigte Salzlösungen.

DIN 50 014: Juli 1985. Normalklimate.

DIN 52 615: November 1987. Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wasserdampf-Durchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen.

DIN 52 617: Mai 1987. Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.

DIN 55 945: Dez. 1988. Beschichtungsstoffe (Lacke, Anstrichstoffe und ähnliche Stoffe), Begriffe.

DIN 4108: Teil 5, August 1981. Wärmeschutz im Hochbau, Berechnungsverfahren.

DIN EN 196: Prüfverfahren für Zement.
Teil 1, Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1: 1987 (Stand 1989).

DIN EN 1062: Lacke und Anstrichstoffe: Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe im Außenbereich und Beton.
Teil 2: Wasserdampf-Diffusionsstromdichte - Bestimmung und Einteilung
Teil 3: Wasserdurchlässigkeitsrate - Bestimmung und Einteilung (Entwurf), Deutsche Fassung prEN 1062-3: 1996.

Dominik, A., Meyer, U., Schubert, P. (1992): Entwicklung von Schlämmen und Verfugmörteln zur Instandsetzung der Außenfassaden der Matthiaskapelle in Kobern-Gondorf. Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4, Verlag Ernst & Sohn, Berlin. S. 135-144.

Dominik, A., Tandina, A.M. (1996): Mineralische Schlämmemörtel – Eigenschaftsveränderungen im Verbund zu verschiedenen Steinen. F.H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), Berichtsband zum 4.ten internationalen Kolloquium ‘Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen’, Technische Akademie Esslingen 17.-19. Dez. 1996, Band 1, S. 455-471.

Franke, L., Pinsler, F., Hauenschild, C., Groß-Fengels,. W. (1995): X-ray diagnosis applied to study salt migration in impregnated structural elements. Proceedings of the firstInternational Symposium on Surface Treatment of Building Materials with Water Repellent Agents. Hrsg.: Wittmann, F.H., Siemes, T.A.J.M., Verhoef, L.G.W., Delft University of Technology on 9th and 10th November 1995.

Garrecht, H. (1992): Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerks. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie Karlsruhe, Heft 15.

Gödicke-Dettmering, T (1997): Mineralogische und technische Eigenschaften von hydraulischem Kalk als Bindemittel von Restaurierungsmörteln für Baudenkmäler aus Naturstein. Bericht Nr. 6 – 1997, Institut für Steinkonservierung.

Grote, R. J., Glashoff, H., Pandlowsky, D. (1994): Die Erfassung der mittelalterlichen Wandmalereien in Niedersachsen - Ein Projekt zum Schutz einer gefährdeten Kunstgattung, Berichte zur Denkmalpflege 14, Heft 2, S. 70-77.

Henkel, F. (1955): Untersuchungen über die Kohlensäureaufnahme von Mörteln. Zement-Kalk-Gips 8, S. 386-393.

Herm, C. (1991): Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Anstrichen auf Naturstein. Arbeitsblätter für Restauratoren, Nr. 2, S. 238-246, Freiburg-Mainz.

Herm, C.; Boehm, H. P.; Snethlage, R. (1993): 'The influenze of additives on lime wash', 2nd international EUROLIME Meeting, Copenhagen 20th-23rd August 1993, Contributions,.pp. 32-36.

Herm, C.; Warscheid, T. (1993): Freibewitterung von Anstrichen auf Godlandsansdstein – Untersuchungen zu Wasserhaushalt und Mikrobiologie. BMFT Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung, Band 5, Verlag Ernst und Sohn, Berlin.

Herm, C. (1997): Anstriche auf Naturstein – Untersuchungen zu Zusammensetzung historischer Fassungen, Kolloidchemie von Kalkfarbe und Bauphysik. Dissertation, Ludwig-Maximilians Universität München.

Hoffmann, D.; Niesel, K. (1993): Evaluation of lime mortar by physiko-technical characteristics. Deutsches EUROCARE Sekretariat Universität Karlsruhe (Hrsg): 2nd International Eurolime Meeting, Kopenhagen, 20.-23.8.1993, Contributions EUROLIME Newsletter No.2, Kalrsruhe, S.37-40.

Hoffmann, D.; Rooß, H. (1994): Zur Erhärtung von Purpasten aus Kalk. Bautenschutz und Bausanierung 17, 48-51, 57-63.

Hollemann-Wiberg: Lehrbuch der anorganischen Chemie 81.-90. Auflage 1976.

Holm, A., Krus, M., Künzel, H.M. (1999): Grenzen der Feuchtetransportberechnung von Betonaußenbauteilen. F. H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - „MSR'99" Technische Akademie Esslingen Nov. / Dez. 1999. Bd. 1, S. 405-414.

Hubrich, K., Goretzki, L. (1999): Die Witterungsbeständigkeit von Beschichtungen auf Gipskalkputzen. F. H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - „MSR‘99“ Technische Akademie Esslingen Nov. / Dez. 1999. Bd. 2, S. 977-987.

Karsten, R. (1983): Bauchemie für Studium und Praxis. Lüdecke Verlagsges. Haslach i. d. K., 7. Auflage, S. 498-500.

Kießl, K. (1983): Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität – Gesamthochschule – Essen.

Klopfer, H. (1974): Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. 235 S. Wiesbaden-Berlin, Bauverlag.

Knöfel, D., Schubert, P. (Hrsg.) (1993): Handbuch Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege, Verlag Ernst und Sohn Berlin.

Knöfel, D., Henkel, S., Aschhoff, A. (1995): Ist die Messung mit dem Karsten’schen Prüfrohr zuverlässig? Bautenschutz und Bausanierung 6, S. 36-41.

Knöfel, D., Winnefeld, F. (1995): Anpassung von Fugendeckmörteln an Ziegelmauerwerk, Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, S. 147-157.

Königfeld, P., Stadlbauer, E. (1997): Nutzen oder Schaden durch Freilegen historischer Wandmalereien im Sinne der Substanzerhaltung - Kunsttechnologische, mineralogische und feuchtetechnische Untersuchungen. Abschlußbericht zum Förderprojekt des Landes Niedersachsen (Kapitel 0608 TG 74).l

Kraus, K., Wisser, S., Knöfel, D. (1989): Über das Löschen von Kalk vor der Mitte des 18. Jahrhunderts – Literaturauswertung und Laborversuche. Arbeitsblätter für Restauratoren, Gruppe 6, Heft 1, S. 206-221.

Kraus, K. (1996): Kalkmörtel für die Denkmalpflege, Bauchemie heute: Fakten Modelle, Anwendungen: Festschrift zum 60.Geburtstag von Prof. Dr. Knöfel, Hrsg.: K.G. Böttger, Darmstadt, S. 213-219.

Krischer, O. (1992): Trocknunggstechnik, erster Band. - korrigierter und erg. Nachdruck, 3. neubearbeiteten Auflage von W. Kast,. Springer Verlag, Berlin.

Krus, M. (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe – Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation Universität Stuttgart.

Künzel, H. (1969): Anforderungen an Außenanstriche und Beschichtungen aus Kunstharzdispersionen. Kunststoffe im Bau 12, S. 6-32, Heidelberg.

Künzel, H. (1991): Trocknungsblockade durch Mauerversalzung. Bautenschutz und Bausanierung 14, Heft 4, S. 63-66.

Künzel, H., Holz, D. (1991): Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten und beheizten Gebäuden alter Bauart. IBP-Bericht FB-32/1991 Teil A. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, T 2396.

Künzel, H., Riedl, G. (1996): Werktrockenmörtel – Kalkputz in der Denkmalpflege. Bautenschutz und Bausanierung, Sonderdruck aus Ausgabe 2, S. 3-7, 1996.

Künzel, H. M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart.

Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf (1985): Lehrbuch der Bauphysik. Teil 1 einer Baukonstruktionslehre. B. G. Teubner Stuttgart.

Meier, H.G. (1995): Zuschläge und Zusätze für mineralische Fassadenputze. Bausubstanz 11, H. 4, S. 52-56.

Meyer, U. (1993): Schlämmen für Natursteinmauerwerk - Anforderungen, Eigenschaften, Prüfverfahren, Applikation. F. H. Wittmann (Hrsg.) Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2. Kontakt und Studium Baupraxis Bd. 420, S. 1025-1035.

Möller, H-H. (Hrsg) (1990): "Wandmalerei-Schäden", Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 8.

Mora, P., Mora, L., Philippot, P. (1984): Conservation of Wall Paintings, Butterworths, London, pp.358-418.

Nerger, F. (1995): Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten von Porenbetonaußenwänden unter besonderer Beachtung der thermischen Leitfähigkeit. Dissertation, Fakultät Bauwesen der technischen Hochschule Leipzig.

Neumann, H. H.: Untersuchungsbericht des vom BMBF geförderten Projektes BAU 1015k, Eilsum. Zusammenfassender Untersuchungsbericht zur Salzbelastung ev.-ref. Kirche in Eilsum / Krummhörn. Universität Hamburg, Institut für Anorganische und Angewandte Chemie, 1993.

Ney, P. (1967): Die Erhärtung von Luftkalkmörteln als Kristallisationsvorgang. Zement-Kalk-Gips 20, S. 429-434.

Niemeyer et al. (2000): Mathematische Abschätzung des w-Wertes anhand der Messungen mit dem Karsten’schen Prüfröhrchen. (In Vorbereitung)

Oldenburg, P. (1994): Kloster Lüne - Die Wandmalereien des Refektoriums. Diplomarbeit an der FH Hildesheim/Holzminden (unveröffentlicht).

Palladio (1570): Andrea I Quattro Libri Dell‘ Architectura, Venedig.

Pleyers, G. (1999): a) Eine Alternative zur Prüfung der Wasserdampf-Durchlässigkeit von Baustoffen – die WDL-Prüfung. F. H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - „MSR‘99“ Technische Akademie Esslingen Nov. / Dez. 1999. Bd. 1, S. 497-508.

Pleyers, G. (1999): b) Zerstörungsfreie Prüfung der Flüssigkeitsaufnahme von Baustoffen – das Prüfröhrchen nach Pleyers. F. H. Wittmann, A. Gerdes (Hrsg.), 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - „MSR‘99“ Technische Akademie Esslingen Nov. / Dez. 1999. Bd. 1, S. 471-484.

Plinius d. Ä., Gaius P. Secundus (ca. 60 n. Chr.): Naturalis historiae, libri XXXVII.

Rauschenbach, F. (1994): Organische Mörtelzusätze, Stuck, Putz, Trockenbau. H. 10, S. 14-18.

Richardson, M. (1988): Carbonation of reinforced concrete. Ist causes and management. Dublin 1988 (in Hoffmann und Rooß 1994):

Rösch, H & Schwarz, H-J. (1994): Mineralogische und anorganisch-chemische Untersuchungen zur Klärung der Schadensursachen an romanischen Wandmalereien. In: Segers-Glocke, C. (Hrsg): "Wandmalerei-Schäden", Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 11, S. 104-114.

Romberg, H. (1978): Zementsteinporen und Betoneigenschaften. Beton-Information 18, Heft 5, S. 50-55.

Sattler, L.; Wendler, E.; Snethlage, R.; Klemm, D. D. (1989): Kalenderhalbjährliche Fortsetzungsberichte des vom BmFT geförderten Projektes BAU 1015 J, TA-Nr. (2a).4, Stand 31.12.1989.

Schäfer, J.; Hilsdorf, H. K. (1993): Historische Kalkmörtel und ihr Ersatz - Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften. In: F. Wittmann (Hrsg.) Werkstoffwissenschaften und Bausanierung Teil 2, S. 1178-1199, Kontakt und Studium Bd. 420, Expert Verlag.

Schmidt, H. (1993): EUROLIME – Zur Entwicklung des Forschungsprojektes in den Jahren 1991-1993. Newsletter No.2, 2nd international EUROLIME Meeting, Copenhagen 20th-23rd August 1993, Contributions,.pp. 4-5.

Schramm, H.-P.& Hering, B. (1988): Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung. Akademische Druck- und Verlagsanstalt, Graz.

Schwarz, H. J., Rösch: Mineralogische und anorganische-chemische Untersuchungen zur Salz- und Feuchtebelastung der romanischen Wandmalereien in Krummhörn / Eilsum. Abschlußbericht 1993. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Segers-Glocke, C. (Hrsg.)(1994): Forschungsprojekt Wandmalerei-Schäden. Arbeitshefte zur Denkmalpflege 11, Niemeyer Verlag Hameln.

Seifert, K. (1982): Wasserdampfdiffusion im Bauwesen. 3. Auflage, 214 S. Wiesbaden-Berlin, Bauverlag.

Setzer, M. J. (1986): Transportvorgänge und Porenstruktur. Mitteilungen. aus dem Forschungsinstitut des Ver. der Österr. Zementfabr., intern. Kolloq. Wien 17-18.111.1986, S. 7-17.

Sommer, E. (1971): Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porigen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.

Stadlbauer, E.; Brandes, C. (1994): Farbe auf Stein - Neue Erkenntnisse zu einem alten Thema. Berichte zur Denkmalpflege 14, Heft 2, S. 77-81.

Strübel, G., Kraus, K., Kuhl, O., Gödicke-Dettmering, T. (1992): Hydraulische Kalke für die Denkmalpflege, Institut für Steinkonservierung e. V., Bericht Nr. 1, Wiesbaden.

Trampedach, K. (1993): ‘The examination and conservation of wall paintings, lime wash and lime mortars, Newsletter No.2, 2nd international EUROLIME Meeting, Copenhagen 20th-23rd August 1993, Contributions, pp. 10-16.

Torraca, G. (1986): Poröse Baustoffe: Eine Materialkunde für die Denkmalpflege. Übersetzt, bearbeitet und ergänzt von Johannes Weber. Wien, Verlag der Apfel (Reihe: Restaurierung – Konservierung – Technologie; Bd. 2.

Van Balen, K., (1991): Karbonatatie van Kalkmortel en haar Invloed op historische Strukturen, Dissertation, Fakulteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven.

Van Balen, K.; Van Gemert, D. (1993): Interaction between drying and lime mortar carbonation. in: F. Wittmann (Hrsg.) Werkstoffwissenschaften und Bausanierung Teil 3, S. 1441-1452, Kontakt und Studium Bd. 420, Expert Verlag.

Vitruvius Pollio, M., (ca. 25 n. Chr.): De architecturalibri decem, aus: Vitruv: Baukunst; nach der Übersetzung von August Rode (1976), erschienen als Band 1 mit den Büchern I-V und Band 2 mit den Büchern VI-X im Artemis Verlag für Architektur, Zürich und München, 1987.

Washburn, E.W. (1921): Note on a Method of Determination Pore Sizes in Porous Material, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 7, S. 155-116.

Washburn, E.W. (1921): Phys. Rev., 17, S. 273-283.

Weber, H. (1995): Bindemittel für mineralische Fassadenputze – Putzserie Teil 2, Bausubstanz Heft 2, S. 54-58.

Wehlte, K. (1967): Werkstoffe und Techniken der Malerei. 856 S. Otto Maier Verlag Ravensburg.

Wendler, E., Snethlage, R., (1989): Der Wassereindringprüfer nach Karsten - Anwendung und Interpretation der Meßwerte. Bautenschutz und Bausanierung 12, S. 110-115.

Wisser, S., Knöfel, S. (1987): Untersuchungen an historischen Putz- und Mauermörteln, Teil1: Analysengang. Bautenschutz und Bausanierung 10, S. 124-126.

Wisser, S., Knöfel, S. (1988): Untersuchungen an historischen Putz- und Mauermörteln, Teil 2: Untersuchungen und Ergebnisse. Bautenschutz und Bausanierung 11, S. 163-171.

Wisser, S. (1989): Historische und moderne Mörtel im Verbund mit Naturstein: chemisch-mineralogische und mörteltechnische Eigenschaften, Dissertation Albert-Ludwigs Universität Freiburg i. Br., Hochschulverlag Freiburg i. Br.

Würzner, K (1919): Die physikalischen Grundlagen des Abbindens und Erhärtens. Zement 8, Nr. 46, S. 559-562, Nr.47, S. 571-574.

WTA - Merkblatt 2-3-92 (1993): Bestimmung der Wasserdampfdiffusion von Beschichtungsstoffen entsprechend DIN 55 945. Bautenschutz und Bausanierung 16, S. 28-29.

9 Anhang

Auszug aus der Auswertung der Änderung der Wasserdampf-Diffusionsänderungen von Kalkputzen während der Carbonatisierung

					Probe Ic			Probe VIIIb			Probe VIIIc
messer der Probe [cm]											
läche der Probe [cm²]					50,00			41,47			41,79
cke der Probe [cm]					1,08			1,1			1,01
ichtdicke Prüfgefäß [cm]					4,2			4,2			4,2
µ-Wert [-]					**14,71**			**7,57**			**6,49**
ndardabweichung					2,66			1,05			0,92
		Torr									
	Temp.	Luftdruck	**Luftdruck**	**Feuchte**	**m**	**µ**	**sd**	**m**	**µ**	**sd**	**m**
Datum	**[°C]**	[mmHg]	**[hPa]**	**[%]**	**[g]**	**[-]**	**[m]**	**[g]**	**[-]**	**[m]**	**[g]**
					Ia						
11.7.94 10:00	23,00		1013,25	52,00	342,679						
12.7.94 12:00	23,00		1013,25	55,00	341,936	10,50					
13.7.94 11:20	23,00		1013,25	55,00	341,281	10,75		325,43			319,760
14.7.94 12:00	23,82	7,608	1014,32	61,48	340,692	11,59	0,11	320,41	-2,45	-0,02	316,047
18.7.94 12:30	25,00	7,588	1013,52	53,00	337,527	10,85	0,10	314,66	2,60	0,02	311,585
19.7.94 12:30	25,21	7,577	1010,19	51,11	336,715	11,21	0,10	313,78	7,36	0,07	310,624
20.7.94 12:30	24,92	7,585	1010,19	51,68	335,897	10,63	0,10	312,79	5,68	0,05	309,567
21.7.94 12:30	25,22	7,588	1011,65	50,53	335,084	11,32	0,10	311,87	7,02	0,06	308,582
22.7.94 12:30	25,25	7,588	1011,65	50,20	334,291	11,82	0,11	310,96	7,13	0,06	307,632
25.7.94 12:15	25,00	7,560	1007,92	52,00	331,807	10,33	0,10	308,27	6,64	0,06	304,529
27.7.94 12:20	25,00	7,594	1012,45	51,00	330,060	9,83	0,09	306,26	5,65	0,05	302,315
28.7.94 13:20	25,00	7,564	1008,45	50,00	329,188	10,75	0,10	305,25	6,22	0,06	301,196
29.7.94 13:00	25,00	7,583	1010,98	49,00	328,369	11,11	0,10	304,30	6,45	0,06	300,142
1.8.94 10:30	26,41	7,538	1004,98	62,96	326,348	10,28	0,10	301,96	5,87	0,05	297,549
3.8.94 10:30	26,56	7,593	1012,32	56,42	324,824	11,40	0,11	300,23	6,84	0,06	295,597
5.8.94 10:30	26,38	7,597	1012,85	54,84	323,254	11,28	0,10	298,45	6,80	0,06	293,591
8.8.94 10:30	24,53	7,597	1012,85	58,35	321,309	11,17	0,10	296,20	6,48	0,06	291,050
10.8.94 10:30	22,53	7,530	1003,92	44,80	318,723	4,78	0,04	294,51	6,90	0,06	289,320
12.8.94 10:30	24,98	7,499	999,78	59,43	317,569	13,26	0,12	293,18	8,02	0,07	287,831
15.8.94 10:30	25,58	7,576	1010,05	58,71	315,632	12,06	0,11	291,00	7,34	0,07	285,320
18.8.94 10:30	24,91	7,534	1004,45	54,06	313,706	13,33	0,12	288,786	8,04	0,07	282,798
22.8.94 11:30	20,55	7,547	1006,18	55,06	311,802	13,46	0,12	286,607	8,14	0,07	280,324
24.8.94 10:30	28,80	7,548	1006,32	71,00	311,097	20,88	0,19	285,777	12,91	0,12	279,382
25.8.94 11:00	22,72	7,514	1001,78	47,15	310,490	14,79	0,14	285,045	8,37	0,08	278,556
26.8.94 10:30	22,93	7,521	1002,72	48,36	309,888	13,93	0,13	284,35	8,34	0,08	277,768
29.8.94 10:30	22,94	7,549	1006,45	48,66	308,142	14,77	0,14	282,232	8,26	0,08	275,36
30.8.94 10:30	22,58	7,552	1006,85	47,51	307,567	14,97	0,14	281,526	8,23	0,07	274,563
31.8.94 10:30	22,50	7,565	1008,58	48,40	307,004	14,90	0,14	280,843	8,33	0,08	273,789
1.9.94 11:30	22,48	7,532	1004,18	49,18	306,43	15,06	0,14	280,127	8,07	0,07	272,974
2.9.94 10:30	22,86	7,548	1006,32	50,32	305,881	14,28	0,13	279,451	7,72	0,07	272,217
5.9.94 11:30	22,41	7,555	1007,25	50,56	304,217	14,48	0,13	277,409	7,87	0,07	269,907
7.9.94 10:30	22,05	7,539	1005,12	52,30	303,225	14,85	0,14	276,181	7,99	0,07	268,575
8.9.94 10:30	21,79	7,490	998,58	58,55	302,778	14,35	0,13	275,64	7,94	0,07	267,99
9.9.94 10:30	20,44	7,486	998,05	56,60	302,333	13,67	0,13	275,096	7,36	0,07	267,385
12.9.94 10:30	22,07	7,504	1000,45	51,38	300,626	13,08	0,12	273,016	6,98	0,06	265,059
13.9.94 7:30	21,21	7,531	1004,05	54,50	300,238	15,45	0,14	272,524	8,03	0,07	264,517
14.9.94 10:40	21,00	7,472	996,18	55,00	299,712	14,19	0,13	271,915	8,38	0,08	263,813
15.9.94 10:30	22,13	7,379	983,79	51,89	299,185	14,53	0,13	271,268	7,84	0,07	263,094
16.9.94 10:30	22,13	7,419	989,12	51,99	298,675	15,16	0,14	270,656	8,55	0,08	262,402
19.9.94 10:30	21,70	7,558	1007,65	52,16	297,165	14,41	0,13	268,849	8,07	0,07	260,361
20.9.94 10:40	20,30	7,532	1004,18	53,20	296,677	13,09	0,12	268,267	7,21	0,07	259,703
21.9.94 10:30	21,10	7,566	1008,72	53,00	296,201	14,24	0,13	267,689	7,75	0,07	259,062
22.9.94 10:30	21,49	7,624	1016,45	53,56	295,679	12,75	0,12	267,068	6,99	0,06	258,349
23.9.94 10:40	21,60	7,640	1018,58	52,02	295,201	15,25	0,14	266,485	8,36	0,08	257,688
26.9.94 10:30	21,30	7,575	1009,92	55,00	293,851	14,75	0,14	264,852	8,11	0,07	255,861
27.9.94 10:30	20,50	7,568	1008,98	52,60	293,363	13,27	0,12	264,269	7,27	0,07	255,187
28.9.94 12:10	20,80	7,606	1014,05	53,90	292,83	12,64	0,12	263,64	6,98	0,06	254,458
29.9.94 10:30	21,40	7,607	1014,18	52,30	292,343	13,05	0,12	263,039	6,72	0,06	253,779
30.9.94 10:30	21,10	7,603	1013,65	52,70	291,872	14,51	0,13	262,452	7,55	0,07	253,126

Klima- und weitere Daten zur Berechnung der Wasserdampf-Diffusionswiderstände von in der Carbonatisierungsphase befindlichen Kalkputzen:

Mittelwerte der Klimadaten über jeden Tag:

Datum:	% rH	°C		*Konstante:*	Datum:	% rH	°C		*Konstante:*
14.07.94	61,48	23,82	14.7.94 12:00	*19,68*	28.10.94	47,84	19,17	28.10.94 10:30	*19,32*
18.07.94	*64,17*	24,25	18.7.94 12:30		31.10.94	52,53	18,26	31.10.94 10:30	*16,55*
19.07.94	51,11	25,21	19.7.94 12:30	*25,12*	01.11.94	57,56	18,68	1.11.94 10:30	*15,23*
20.07.94	51,68	24,92	20.7.94 12:30	*26,59*	02.11.94	46,19	18,83	2.11.94 10:30	*18,97*
21.07.94	50,53	25,22	21.7.94 12:30	*25,79*	03.11.94	42,50	18,94	3.11.94 10:00	*20,55*
22.07.94	50,20	25,25	22.7.94 12:30	*26,95*	04.11.94	40,37	18,98	4.11.94 10:15	*22,25*
25.07.94	52,00	25,00	25.7.94 12:15	*27,16*	07.11.94	50,00	19,10	7.11.94 11:00	*18,63*
27.07.94	51,00	25,00	27.7.94 12:20	*26,63*	08.11.94	51,00	18,80	8.11.94 11:00	*17,95*
28.07.94	50,00	25,00	28.7.94 13:20	*28,1*	09.11.94	49,8	18,8	9.11.94 11:00	*18,23*
29.07.94	49,00	25,00	29.7.94 13:00	*27,68*	10.11.94	48,65	18,69	10.11.94 10:30	*18,43*
01.08.94	62,96	26,41	1.8.94 10:30	*28,26*	11.11.94	51,97	18,86	11.11.94 10:30	*17,08*
03.08.94	56,42	26,56	3.8.94 10:30	*20,78*	14.11.94	53,91	18,66	14.11.94 10:30	*16,5*
05.08.94	54,84	26,38	5.8.94 10:30	*25,74*	15.11.94	58,31	18,96	15.11.94 10:30	*15,23*
08.08.94	58,35	24,53	8.8.94 10:30	*26,39*	17.11.94	56,93	18,98	17.11.94 10:00	*15,08;15,74*
10.08.94	44,80	22,53	10.8.94 10:30	*21,7*	18.11.94	56,99	19,33	18.11.94 11:30	*16,78*
12.08.94	59,43	24,98	12.8.94 10:30	*25,37*	21.11.94	56,85	19,3	21.11.94 10:30	*15,16*
15.08.94	58,71	25,58	15.8.94 10:30	*21,73*	22.11.94	60,24	18,82	22.11.94 10:30	*14,39*
18.08.94	54,06	24,91	18.8.94 10:30	*22,53*	23.11.94	58,63	18,90	23.11.94 10:30	*15,06*
22.08.94	55,06	20,55	22.8.94 11:30	*24,54*	24.11.94	59,28	18,87	24.11.94 11:00	*15,1*
24.08.94	71,00	28,80	24.8.94 10:30	*18,96*	25.11.94	58,75	19,00	*25.11.94 10:30*	*14,79*
25.08.94	47,15	22,72	25.8.94 11:00	***18,83***	28.11.94	58,87	18,60	28.11.94 10:30	*15,22*
26.08.94	48,36	22,93	26.8.94 10:30	*25,07*	29.11.94	59,65	18,59	29.11.94 10:30	*14,4*
29.08.94	48,66	22,94	29.8.94 10:30	*23,84*	30.11.94	59,86	18,85	30.11.94 10:30	*14,56*
30.08.94	47,51	22,58	30.8.94 10:30	*24,23*	01.12.94	59,46	18,91	1.12.94 10:30	*14,76*
31.08.94	48,40	22,50	31.8.94 10:30	*24,2*	02.12.94	58,25	18,89	2.12.94 10:30	*15,19*
01.09.94	49,18	22,48	1.9.94 11:30	*23,67*	05.12.94	56,08	18,36	5.12.94 10:30	*15,44*
02.09.94	50,32	22,86	2.9.94 10:30	*24,25*	06.12.94	57,02	18,51	6.12.94 10:30	*15,26*
05.09.94	50,56	22,41	5.9.94 11:30	*22,31*	07.12.94	54,8	18,61	7.12.94 10:30	*16,15*
07.09.94	52,30	22,05	7.9.94 10:30	*23,5*	08.12.94	53,21	18,63	8.12.94 11:00	*17,09*
08.09.94	58,55	21,79	8.9.94 10:30	*20,22*	09.12.94	54,19	18,71	9.12.94 10:30	*16,12*
09.09.94	56,60	21,84	9.9.94 10:30	*18,18*	12.12.94	52,95	18,57	12.12.94 10:45	*16,93*
12.09.94	51,38	20,96	12.9.94 10:30	*19,09*	13.12.94	55,63	18,67	13.12.94 10:30	*15,55*
13.09.94	54,50	21,21	13.9.94 10:30	*20,22*	14.12.94	53,68	18,86	14.12.94 10:30	*16,82*
14.09.94	55,00	21,00	14.9.94 10:40	*19,21*	15.12.94	49,76	18,91	15.12.94 10:30	*18,3*
15.09.94	51,89	22,13	15.9.94 10:30	*18,88*	16.12.94	46,81	18,79	16.12.94 11:00	*18,53*
16.09.94	51,99	22,13	16.9.94 10:30	*22,31*	20.12.94	44,66	18,27	20.12.94 10:30	*19,25*
19.09.94	52,16	21,70	19.9.94 10:30	*20,61*	21.12.94	49,58	18,44	21.12.94 10:30	*17,83*
20.09.94	53,20	20,30	20.9.94 10:40	*20,86*	22.12.94	51,47	18,35	22.12.94 11:00	*17,41*
21.09.94	53,00	21,10	21.9.94 10:30	*18,78*	02.01.95	48,61	16,94	2.1.95 10:30	*16,44*
22.09.94	53,56	21,49	22.9.94 10:30	*19,59*	03.01.95	43,45	16,72	3.1.95 10:30	*17,89*
23.09.94	52,02	21,60	23.9.94 10:40	*19,98*	04.01.95	36,60	16,40	4.1.95 10:30	*19,85*
26.09.94	55,00	21,30	26.9.94 10:30	*20,93*	05.01.95	36,95	16,31	5.1.95 10:30	*19,48*
27.09.94	52,60	20,50	27.9.94 10:30	*19*	06.01.95	43,71	16,02	6.1.95 10:30	*16,94*
28.09.94	53,90	20,80	28.9.94 10:30	*19,09*	09.01.95	43,93	15,96	9.1.95 11:30	*17,04*
29.09.94	52,30	21,40	29.9.94 10:30	*18,97*	10.01.95	46,41	16,11	10.1.95 10:30	*15,59*
30.09.94	52,70	21,10	30.9.94 10:30	*20,41*	11.01.95	48,21	16,47	11.1.95 10:30	*16,07*
				19,85	12.01.95	47,88	16,71	12.1.95 11:20	*17,1*
04.10.94	53,10	21,40	4.10.94 10:30	*20,07*	13.01.95	45,6	16,83	13.1.95 10:30	*16,57*
05.10.94	54,10	21,10	5.10.94 10:30	*19,26*	16.01.95	45,58	16,86	16.1.95 10:30	*18,48*
06.10.94	52,10	21,10	6.10.94 10:40	*20,23*	17.01.95	47,73	17,08	17.1.95 10:30	*16,87*
07.10.94	50,70	21,90	7.10.94 10:40	*21,77*	18.01.95	43,75	17,44	18.1.95 10:30	*18,6*
10.10.94	52,00	21,20	10.10.94 11:30	*20,97*	19.01.95	44,72	17,71	19.1.95 10:30	*18,62*
11.10.94	52,20	21,20	11.10.94 11:15	*19,97*	20.01.95	46,93	17,94	20.1.95 10:30	*18,14*
12.10.94	53,20	21,80	12.10.94 11:30	*20,74*	23.01.95	46,21	18,1	23.1.95 10:30	*18,59*

Luftdruckveränderungen während der Messung des Dauer-WDD /Kalkputz:

Datum	Luftdruck	**Datum**	Luftdruck
	[mmHg]		[mmHg]
14.7.94 12:00	7,608	20.10.94 10:30	7,545
18.7.94 12:30	7,588	24.10.94 11:00	7,479
19.7.94 12:30	7,577	25.10.94 10:30	7,484
20.7.94 12:30	7,585	26.10.94 10:30	7,474
21.7.94 12:30	7,588	27.10.94 10:30	7,499
22.7.94 12:30	7,588	28.10.94 10:30	7,517
25.7.94 12:15	7,560	31.10.94 10:30	7,474
27.7.94 12:20	7,594	1.11.94 10:30	7,542
28.7.94 13:20	7,564	2.11.94 10:30	7,614
29.7.94 13:00	7,583	3.11.94 10:00	7,598
1.8.94 10:30	7,538	4.11.94 10:15	7,581
3.8.94 10:30	7,593	7.11.94 11:00	7,544
5.8.94 10:30	7,597	8.11.94 11:00	7,544
8.8.94 10:30	7,597	9.11.94 11:00	7,539
10.8.94 10:30	7,530	10.11.94 10:30	7,515
12.8.94 10:30	7,499	11.11.94 10:30	7,571
15.8.94 10:30	7,576	14.11.94 10:30	7,571
18.8.94 10:30	7,534	15.11.94 10:30	7,509
22.8.94 11:30	7,547	17.11.94 10:00	7,527
24.8.94 10:30	7,548	18.11.94 11:30	7,537
25.8.94 11:00	7,514	21.11.94 10:30	7,594
26.8.94 10:30	7,521	22.11.94 10:30	7,655
29.8.94 10:30	7,549	23.11.94 10:30	7,644
30.8.94 10:30	7,552	24.11.94 11:00	7,649
31.8.94 10:30	7,565	*25.11.94 10:30*	7,683
1.9.94 11:30	7,532	28.11.94 10:30	7,662
2.9.94 10:30	7,548	29.11.94 10:30	7,704
5.9.94 11:30	7,555	30.11.94 10:30	7,692
7.9.94 10:30	7,539	1.12.94 10:30	7,692
8.9.94 10:30	7,490	2.12.94 10:30	7,668
9.9.94 10:30	7,486	5.12.94 10:30	7,589
12.9.94 10:30	7,504	6.12.94 10:30	7,594
13.9.94 7:30	7,531	7.12.94 10:30	7,573
14.9.94 10:40	7,472	8.12.94 11:00	7,530
15.9.94 10:30	7,379	9.12.94 10:30	7,566
16.9.94 10:30	7,419	12.12.94 10:45	7,598
19.9.94 10:30	7,558	13.12.94 10:30	7,586
20.9.94 10:40	7,532	14.12.94 10:30	7,637
21.9.94 10:30	7,566	15.12.94 10:30	7,675
22.9.94 10:30	7,624	16.12.94 11:00	7,631
23.9.94 10:40	7,640	20.12.94 10:30	7,590
26.9.94 10:30	7,575	21.12.94 10:30	7,595
27.9.94 10:30	7,568	22.12.94 11:00	7,677
28.9.94 12:10	7,606	2.1.95 10:30	7,497
29.9.94 10:30	7,607	3.1.95 10:30	7,673
30.9.94 10:30	7,603	4.1.95 10:30	7,611
4.10.94 10:30	7,548	5.1.95 10:30	7,682
5.10.94 10:30	7,640	6.1.95 10:30	7,611
6.10.94 10:40	7,709	9.1.95 11:30	7,651
7.10.94 10:00	7,664	10.1.95 10:30	7,453
10.10.94 11:20	7,632	11.1.95 10:30	7,461
11.10.94 11:15	7,643	12.1.95 11:20	7,572
12.10.94 11:30	7,672	13.1.95 10:30	7,705
13.10.94 11:30	7,703	16.1.95 10:30	7,652
14.10.94 12:30	7,653	17.1.95 10:30	7,556
17.10.94 10:30	7,629	18.1.95 10:30	7,505
18.10.94 10:30	7,630	19.1.95 10:30	7,549
19.10.94 11:50	7,568	20.1.95 10:30	7,543

Genaue Zusammensetzungen der Schlämmenrezepturen S1-S12 der Testfläche an der Ostwand der Kirche in Eilsum (nach den Infoblättern der ausführenden Restauratoren)**:**

S1

Füllstoffe:

1000 ml Quarzmehl (Korngröße 0,10 – 0,25)

1500 ml Quarzmehl (Korngröße 0,25 – 0,40)

750 ml Schamottmehl (Korngröße < 0,50)

Pigmente:

120 gr Ocker dunkel

200 gr Terra di Siena natur

250 gr Terra di Siena gebrannt

98 gr Umbra rötlich

25 gr Umbra grünlich

150 gr Eisenoxid natur

20 gr Eisenoxid mittel

Bindemittel:

200 gr Billerbecker Kalk

1080 ml Sumpfkalk

S2

Füllstoffe:

1000 ml Quarzmehl (Korngröße 0,10 – 0,25)

500 ml Quarzmehl (Korngröße 0,25 – 0,40)

550 ml Schamottmehl (Korngröße < 0,50)

Pigmente:

120 gr Ocker dunkel

260 gr Terra di Siena natur

300 gr Terra di Siena gebrannt

30 gr Umbra grünlich

150 gr Eisenoxid natur

Bindemittel:

1050 ml Sumpfkalk

S3

Füllstoffe:

1250 ml Quarzmehl (Korngröße 0,10 – 0,25)

1250 ml Quarzmehl (Korngröße 0,25 – 0,40)

250 ml Schamottmehl (Korngröße < 0,50)

Pigmente:

120 gr Ocker dunkel

40 gr Ocker hell

161 gr Terra di Siena natur

300 gr Terra di Siena gebrannt

150 gr Eisenoxid natur

Bindemittel:

1500 ml Sumpfkalk

S4

Wie Rezeptur S1 plus 160 ml Leinöl

S5

Wie Rezeptur S2 plus 160 ml Leinöl

S6

Wie Rezeptur S3 plus 160 ml Leinöl

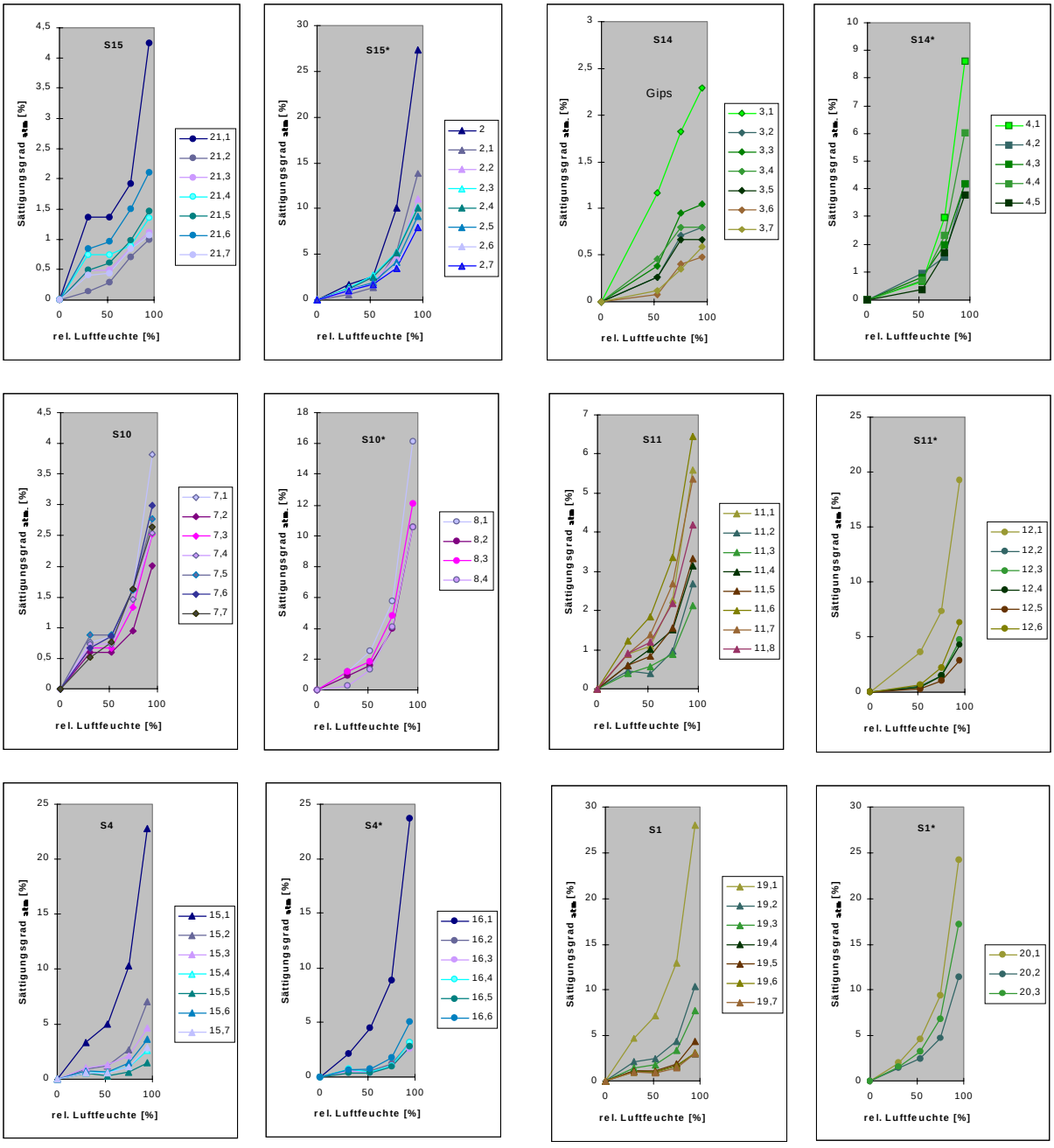
Schlämmenrezepturen S7 – S9 (nach Infoblatt der ausführenden Restauratoren)**:**

	S7-S9 allgemein	**S7**	**S8**	**S9**
Putz	"Baltus"-Muschelkalk Fugenmörtel (Fertigputz ohne Zement) s. Merkblatt MK-FM 92	Art der Kittung: Fugenausfüllung, evtl. Steinausgleich und Wasserablaufkante schaffen	Putz/Kittung: s. S7	Putz/Kittung: s. S7
Malschicht-Grundierung:	40 g Pulverkasein, 125 ccm Wasser, 33 g Breikalk, 3-5% Leinölfirnis	Grundierung mit Kasein (Rezept wie vor), 200g Sumpfkalk	Sumpfkalk-Wasser 1:10, 1 x Auftrag	Hydratkalk-Wasser 1:5 1 x Auftrag
Zwischenfassung	Rezept wie vorher mit folg. Pigmenten: Engl. Rot, Eisenoxidgelb Eisenoxidschwarz, Goldocker	Lasur mit Kasein und Pigmenten	Sumpfkalk-Wasser 1:5, 2 x Auftrag	Hydratkalk-Wasser 1:5 mit Pigmenten 1 x Auftrag
Endfassung	Rezept wie vorher mit Pigmenten	Lasur mit Kasein und Pigmenten	Sumpfkalk-Wasser 1:5, mit Pigmenten 5-10%, 3 x Auftrag	Hydratkalk-Wasser 1:5 mit Pigmenten 2 x Auftrag
Quelle Putz/Kittung S7-S9: Hersteller Baltus Trockenbaustoffe Bremen Quelle Rezept S7: Fass. Kasein, Kurt Wehlte, Techniken der..., O. Maier Verlag.				

Schlämmenrezepturen S10 – S12:

	S10-S12 allgemein	**S10**	**S11**	**S12**
Putz	"Trass-Kalk-Sand" 0,5 : 1 : 3, Sandkörnung: 0,5, Kalk: Sumpfkalk Trass: gem. Tuff	"Trass-Kalk-Sand" 0,5 : 1 : 3, mit 0,5 Rt Ziegelmehl; Art der Kittung: s. S7	Putz/Kittung: s. S7	Putz/Kittung: s. S7
Malschicht-Grundierung:		Sumpfkalk-Wasser 1:5, 1 Rt Dyckerhoff Weiß, 10% Kasein, 3% Leinöl	Kalkschlämmanstrich, Sumpfkalk-Wasser mit feinem Sand 1 x Auftrag	Sumpfkalk-Wasser 1:5, 15% Pigmente 12% Leinölfirnis 10% Ziegelmehl 1 x Auftrag
Zwischenfassung	Rezept wie vorher mit folg. Pigmenten: Engl. Rot, Eisenoxidgelb Eisenoxidschwarz, Goldocker	Hydratkalk Wasser 1:5, Pigmente, Kasein, 3% Leinölfirnis, 2 x Auftrag	Kalk Wasser 1:5, 1 x Auftrag	wie vorher 1 x Auftrag
Endfassung	Rezept wie vorher mit Pigmenten	Hydratkalk Wasser 1:6, Pigmente, Kasein, 3% Leinölfirnis, 2% Siloxan 1 x Auftrag	Sumpfkalk-Wasser 10%Pigmente 5% Ziegelmehl 3 x Auftrag, anschl. mit Kalksinterwasser besprüht	wie vorher 1 x Auftrag Art der Technik: "Kalkseife"
Quelle Putz/Kittung S10-S12: Manfred Gerner,Historische Häuser erhalten und instands.', Augustus Verlag Augsburg 1990. Quelle Rezept S8: Fass. Baustoffkenntnis 5. Auflage 1962, W. Scholz , Werner Verlag Düsseldorf.				

Sättigungswerte in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchtigkeit (Sorptionsisothermen) Bohrkernscheiben d. ev. ref. Kirche Eilsum Ostwand:



Zur Legende:

Zahl vor dem Komma = Bohrkernnummer

Zahl nach dem Komma = Bohrkerntiefe in cm

S = Bohrkern aus dem Schlämmenbereich über der Horizontalsperre

S* = Bohrkern aus dem Schlämmenbereich unter der Horizontalsperre

Tiefenabhängige maximale Wasseraufnahme d. Bohrkerne d. ev. ref. Kirche Eilsum Ostwand:

BK 21, S15	1,3	2,3	3,2	4,0	5,1	6,6	8,2	cm
atm.	13,27	16,67	19,93	20,22	20,36	19,69	27,32	
vac.	21,02	18,61	21,14	20,89	21,28	21,03	27,85	
BK 2, S15*	0,9	1,4	2,4	3,4	4,4	5,3	6,3	7,6
atm.	9,64	16,19	17,50	18,68	18,32	19,03	19,23	19,12
vac.	21,32	20,60	19,89	20,11	20,07	20,40	20,68	20,68
BK 3, S14	1,4	2,3	3,2	4,1	4,9	6,4	7,7	cm
atm.	23,77	19,09	18,75	17,92	17,80	16,60	15,81	
vac.	21,22	21,97	20,66	20,53	19,78	19,31	19,12	
BK 4, S14*	1,4	2,1	2,9	4,0	4,9	cm		
atm.	16,30	12,22	13,13	8,63	10,57			
vac.	20,53	18,56	19,92	17,93	18,19			
BK 7, S10	1,2	2,1	2,9	3,8	4,6	6,6	9,1	cm
atm.	21,36	20,03	19,76	20,08	19,99	19,15	19,35	
vac.	22,23	21,79	21,18	21,72	21,30	21,57	21,80	
BK 8, S10*	1,1	2,0	3,0	3,7	cm			
atm.	12,57	11,64	10,40	12,70				
vac.	14,51	13,81	12,88	14,82				
BK 11, S11	1,1	2,1	3,1	4,1	4,9	6,3	7,5	9,0
atm.	22,57	19,57	19,67	20,17	20,47	19,74	20,01	20,35
vac.	23,28	21,55	21,55	21,69	21,48	21,63	21,70	21,66
BK 12, S11*	1,0	2,0	2,9	3,9	5,1	6,5	cm	
atm.	20,67	23,25	22,72	22,64	23,31	23,06		
vac.	21,13	24,05	23,90	23,34	24,33	23,99		
BK 15, S4	1,1	1,9	2,9	3,9	4,8	5,7	6,6	cm
atm.	18,65	22,56	23,79	24,76	24,10	23,05	23,79	
vac.	19,79	22,99	24,74	25,61	25,91	24,67	25,00	
BK 16, S4*	1,0	2,0	2,9	3,8	4,9	6,4	cm	
atm.	25,88	22,73	23,21	24,08	24,03	23,74		
vac.	24,59	24,47	24,93	25,12	26,00	25,80		
BK 19, S1	0,9	1,9	2,9	4,1	5,4	6,4	7,5	cm
atm.	26,19	24,78	24,70	24,89	25,97	24,63	24,89	
vac.	26,94	27,64	27,47	28,01	28,17	26,88	26,63	
BK 20, S1*	0,8	1,7	3,2	cm				
atm.	23,74	24,39	23,58					
vac.	25,58	25,63	25,08					

atm.: unter Atmosphärendruck

vac.: unter Vacuum

Tiefenabhängige Salzverteilung d. Bohrkerne ev. ref. Kirche Eilsum Ostwand:

Tiefe bis ...cm, jeweils 1mm Sägeverlust.

Datum	17.04.96	17.04.96	17.04.96	17.04.96	17.04.96	17.04.96	17.04.96	
Labornummer	21,1	21,2	21,3	21,4	21,5	21,6	21,7	**BK 21, S15**
Einwaage	54,710	83,980	81,280	66,280	80,520	168,300	172,940	[g/l]
Leitfähigkeit	204	51	39	40	36	25	22	[µS*dm2/g]
	1,3	2,3	3,2	4,0	5,1	6,6	8,2	Bohrkerntiefe
SO4	10,58	1,52	0,57	0,46	0,20	0,25	0,23	[mg/g]
Cl	0,22	0,18	0,21	0,25	0,29	0,23	0,20	[mg/g]
NO3	0,13	0,11	0,10	0,35	0,36	0,09	0,08	[mg/g]
Ca	4,19	0,68	0,42	0,43	0,32	0,20	0,19	[mg/g]
Mg	0,20	0,03	0,06	0,02	0,01	0,03	0,01	[mg/g]
K	0,02	0,02	0,02	0,01	0,08	0,17	0,12	[mg/g]
Na	0,27	0,21	0,25	0,29	0,25	0,29	0,24	[mg/g]
	15,61	2,75						

Datum	03.04.96	03.04.96	03.04.96	03.04.96	03.04.96	03.04.96	03.04.96	
Labornummer	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5	19,6	19,7	**BK 19, S1**
Einwaage	23,640	27,428	59,920	66,090	64,110	65,700	69,800	[g/l]
Leitfähigkeit	395	106	74	42	44	32	27	[µS*dm2/g]
	0,9	1,9	2,9	4,1	5,4	6,4	7,5	Bohrkerntiefe
SO4	7,65	0,51	0,29	0,16	0,03	0,02	0,03	[mg/g]
Cl	4,22	1,40	1,04	0,56	0,66	0,46	0,39	[mg/g]
NO3	4,42	1,35	1,03	0,52	0,60	0,41	0,33	[mg/g]
Ca	4,42	0,77	0,54	0,28	0,27	0,20	0,13	[mg/g]
Mg	0,05	0,04	0,02	0,07	0,02	0,02	0,03	[mg/g]
K	1,12	0,16	0,36	0,14	0,24	0,19	0,20	[mg/g]
Na	6,77	1,82	1,34	0,73	0,92	0,67	0,66	[mg/g]
	28,64	6,05						

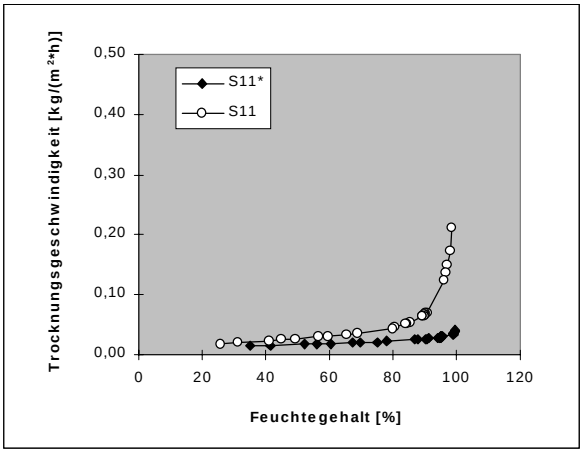
Datum	03.04.96	03.04.96	03.04.96	03.04.96	03.04.96	03.04.96	
Labornummer	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	**BK 16, S4***
Einwaage	20,076	59,340	52,380	95,000	64,040	83,370	[g/l]
Leitfähigkeit	475	45	43	39	39	58	[µS*dm2/g]
	1,0	2,0	2,9	3,8	4,9	6,4	Bohrkerntiefe
SO4	10,51	0,04	0,02	0,02	0,02	0,04	[mg/g]
Cl	2,49	0,37	0,32	0,30	0,30	0,53	[mg/g]
NO3	8,30	1,00	0,97	0,83	0,87	1,52	[mg/g]
Ca	6,88	0,42	0,39	0,38	0,34	0,48	[mg/g]
Mg	0,30	0,05	0,03	0,00	0,02	0,04	[mg/g]
K	0,50	0,02	0,03	0,06	0,02	0,22	[mg/g]
Na	1,84	0,28	0,25	0,17	0,23	0,44	[mg/g]
	30,81	2,17					

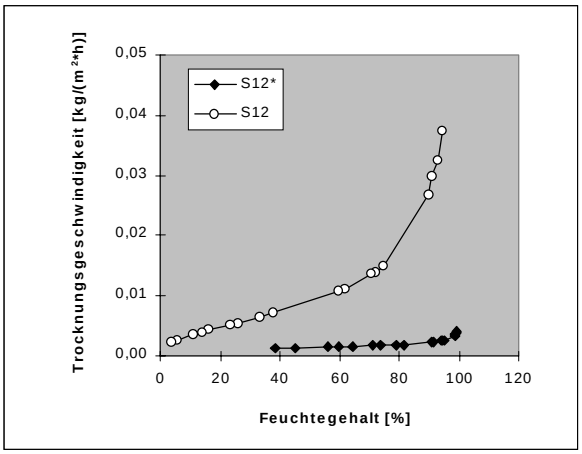
Datum	02.04.96	02.04.96	02.04.96	02.04.96	02.04.96	02.04.96	02.04.96	
Labornummer	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	**BK 15, S4**
Einwaage	29,024	49,240	56,700	96,120	86,220	112,440	97,680	[g/l]
Leitfähigkeit	184	79	54	38	31	30	28	[µS*dm2/g]
	1,1	1,9	2,9	3,9	4,8	5,7	6,6	Bohrkerntiefe
SO4	1,14	0,27	0,12	0,10	0,00	0,03	0,02	[mg/g]
Cl	1,13	0,50	0,30	0,18	0,13	0,22	0,14	[mg/g]
NO3	1,40	0,60	0,39	0,13	0,09	0,21	0,19	[mg/g]
Ca	0,21	0,21	0,14	0,23	0,21	0,15	0,16	[mg/g]
Mg	0,16	0,10	0,15	0,03	0,04	0,09	0,06	[mg/g]
K	1,04	0,61	0,49	0,37	0,25	0,28	0,29	[mg/g]
Na	3,10	1,12	0,60	0,38	0,17	0,29	0,27	[mg/g]
	8,18	3,39						

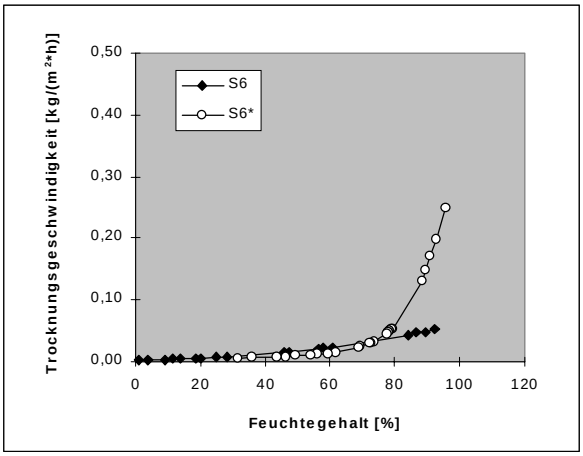
Datum	01.04.96	01.04.96	01.04.96	01.04.96	01.04.96	01.04.96	01.04.96	
Labornummer	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	**BK 3, S14**
Einwaage	33,784	23,448	22,208	19,488	41,850	74,900	96,540	[g/l]
Leitfähigkeit	394	171	245	250	149	61	21	[µS*dm2/g]
	1,4	2,3	3,2	4,1	4,9	6,4	7,7	Bohrkerntiefe
SO4	21,08	6,72	12,27	11,77	6,49	2,59	0,11	[mg/g]
Cl	0,26	0,20	0,15	0,15	0,13	0,10	0,16	[mg/g]
NO3	0,21	0,12	0,18	0,80	0,21	0,21	0,06	[mg/g]
Ca	8,77	2,84	4,39	4,43	2,73	1,01	0,25	[mg/g]
Mg	0,22	0,15	0,08	0,01	0,05	0,12	0,03	[mg/g]
K	0,08	0,19	0,20	0,21	0,11	0,06	0,04	[mg/g]
Na	0,25	1,88	0,14	0,13	0,13	0,10	0,11	[mg/g]
	30,86	12,10						

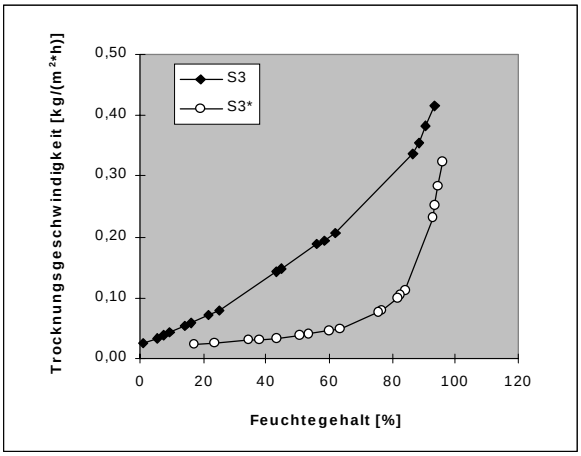
Datum	07.03.96	07.03.96	07.03.96	
Labornummer	20,1	20,2	20,3	**BK 20, S1***
Einwaage	21,736	27,760	27,108	[g/l]
Leitfähigkeit	298	108	162	[µS*dm2/g]
	0,8	1,7	3,2	Bohrkerntiefe
SO4	2,74	0,02	0,06	[mg/g]
Cl	2,51	1,10	1,75	[mg/g]
NO3	7,39	3,14	4,62	[mg/g]
Ca	2,76	0,73	1,04	[mg/g]

Trocknungseigenschaften d. restl. Bohrkerne ev. ref. Kirche Eilsum Ostwand über die Schlämmenoberfläche:

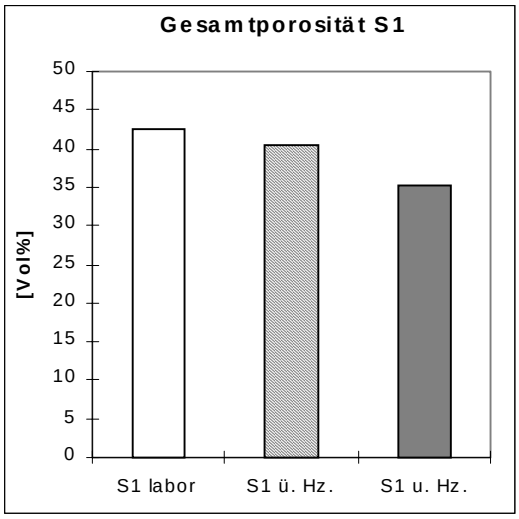


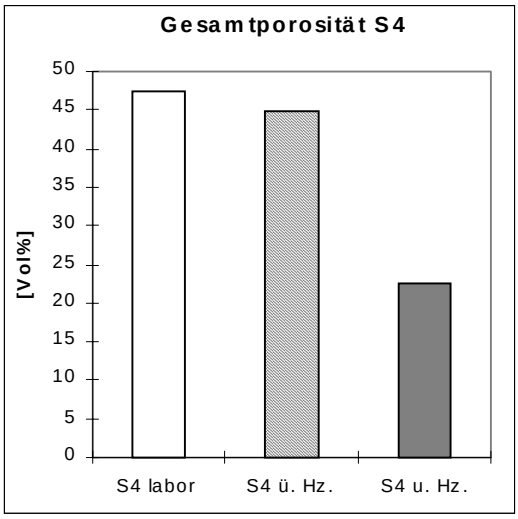


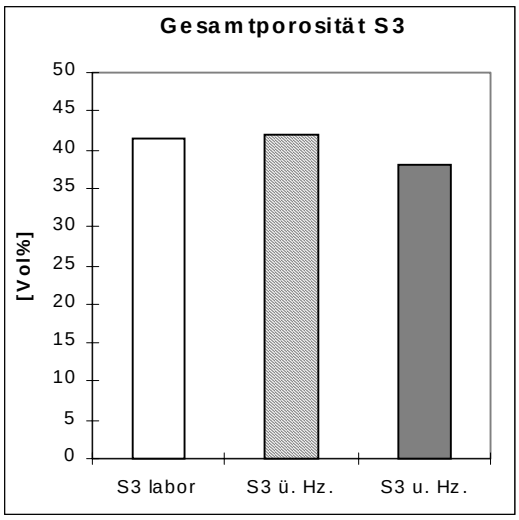


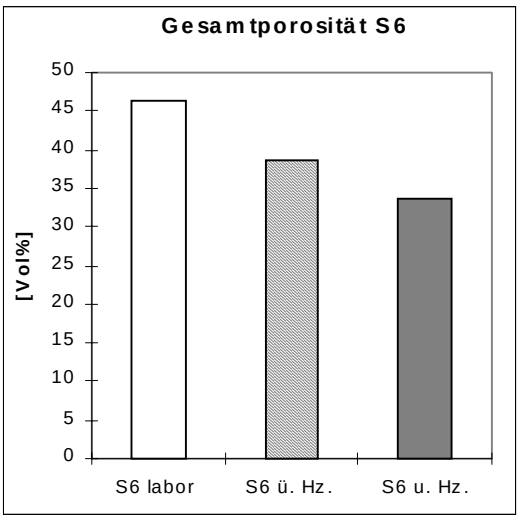


Gesamtporosität der körperhaften Schlämmen (ev. ref. Kirche Eilsum) nach 2,5 Jahren Standzeit:









Salzanalyse **Campen; ev. ref. Kirche** (fett > / = 5%)

Datum		**31.03.92**	**31.03.92**	**31.03.92**	**31.03.92**	**31.03.92**
Probenummer	**C0**	92032401	92032402	92032403	92032404	92032405
Einwaage	[g/l]	0,807	0,763	0,804	0,776	0,804
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	11626	12467	1355	10830	12002
pH-Wert		*10,2*	*10,0*	7,9	*10,0*	*10,5*
SO4	[%]	0,9	0,1	0,7	0,1	0,6
Cl	[%]	0,1	0,2	1,0	0,6	0,2
NO3	[%]	0,2	4,9	3,1	0,9	0,0
Ca	[%]	0,3	0,3	0,9	0,5	0,3
Mg	[%]	0,2	0,4	0,1	0,2	0,4
K	[%]	0,5	2,6	0,4	0,4	0,5
Na	[%]	32,2	32,8	1,9	27,7	29,9
Ionen gesamt	[%]	34,5	41,2	8,1	30,3	31,8

920324 / C0-IH-1	unterer Wandteil B	Ausblühungen,
	Putzabpl. über Teersch.	kristallin
920324 / C0-IIG-2	1m üb. Boden,	Ausblühung od. Putzrest
	Putzabpl. üb. Teersch.	stark anhaftend, kristallin
920324 / C0- I4-3	Halbpfeiler u. Zwickel 4	Ausblühung, watteartig
920324 / C0-IIC-4	Wandteil üb. Absatz	Ausblühung, kristallin
920324 / C0- IIID-5	letzte Bankreihe , 1m	abgeplatzter Putz mit
	üb. Boden	Teerbelag, Ausblühung

Datum		**04.06.93**	**04.06.93**	**04.06.93**	**04.06.93**	**04.06.93**	**04.06.93**
Probenummer	**C1**	93042001	93042001	93042001	93042002	93042002	93042002
Labornummer		innen	außen	Mörtel	innen	außen	Mörtel
Einwaage	[g/l]	11,119	10,685	10,369	10,452	10,246	6,827
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	87	497	372	217	130	825
SO4	[%]	0,1	0,0	0,5	0,2	0,0	2,7
Cl	[%]	0,0	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
NO3	[%]	0,3	2,1	1,1	0,5	0,4	0,4
Ca	[%]	0,1	0,5	0,5	0,2	0,1	1,3
Mg	[%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
K	[%]	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Na	[%]	0,0	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1
Ionen gesamt	[%]	0,6	3,4	2,4	1,2	0,7	4,9

930420 / C1-Süd	ca. 90 cm üb. Boden	Mauerziegel, Mörtelreste
oo1, oo2, oo3	Außenwand	
930420 / C1-Süd	Mitte der Traufhöhe	Mauerziegel, Mörtel
oo4, oo5, oo6	Außenwand	

Datum		10.09.93	10.09.93	10.09.93	10.09.93	10.09.93
Labornummer	**C3**	C3-1H-3	C3-3D-1	C3-2C-1	C3-1A-1	C3-1A-2
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	50298	11922	14844	12706	6712
pH-Wert		*10,5*	*10,0*	*9,6*	6,7	6,8
SO4	[%]	0,6	2,9	0,2	56,8	28,2
Cl	[%]	0,7	0,1	0,2	0,2	0,2
NO3	[%]	0,9	0,2	0,4	0,3	0,3
Ca	[%]	0,6	0,2	0,4	1,0	0,8
Mg	[%]	0,2	0,2	0,0	0,3	0,3
K	[%]	1,4	0,2	0,4	0,6	0,4
Na	[%]	127,6	31,0	40,0	27,9	14,5
Ionen gesamt	[%]	132,0	34,9	41,6	87,0	44,5

931028 / C3-IH-3	Südwand / 1. Gewölbe	Salzpustel (Teerfläche)
931028 / C3-IIID-1	Nordwand / 3. Gewölbe	Salzpustel (Teerfläche)
931028 / C3-IIC-1	Nordwand / 2.Gewölbe	Whisker (obh. Wandabsatz)
931028 / C3-IA-1	Fensterlaibung / West	Salzausblühungen
931028 / C3-1A-2	Fenstersims / West	abgefall. Ausblühungen

Datum		03.02.94	03.02.94	03.02.94	03.02.94
Probenummer	**C4**	93111601	93111603	93111603	93111604
Labornummer		r1	r3hb	r3vb	r4
Nr. korrekt		/ C4-II1-1	/ C4-I2-1	/ C4-II1-2	/ C4-IB-1
Einwaage	[g/l]	61,172	34,420	130,185	93,157
Trockenverlust 105 C	[%]	1,4	1,3	1,4	2,1
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	518	466	362	195
pH - Wert		7,25	7,30	6,76	7,41
SO4	[%]	**1,92**	0,19	**1,08**	**0,33**
Cl	[%]	0,32	**0,58**	**0,30**	0,14
NO3	[%]	**0,95**	**1,46**	**0,69**	**0,51**
Ca	[%]	**0,78**	0,18	**0,43**	0,12
Mg	[%]	0,01	0,02	0,02	0,00
K	[%]	0,09	0,20	0,11	0,04
Na	[%]	**0,43**	**0,76**	**0,41**	**0,34**
Ionen gesamt	[%]	4,5	3,4	3,0	1,5

Datum		03.02.94	03.02.94	03.02.94	03.02.94
Probenummer		93111605	93111606	93111607	93111608
Labornummer		r5	c4(I)3-1	c4(I)3-2	c4(I)4-1
Nr. korrekt		/ C4-I3-3	/ C4-I3-1	/ C4-I3-2	/ C4-II4-1
Einwaage	[g/l]	46,163	25,401	19,859	68,232
Trockenverlust 105 C	[%]	2,2	8,7	0,9	2,8
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	345	1130	952	548
pH - Wert		7,30	6,75	6,82	6,74
SO4	[%]	**2,02**	**6,69**	**1,48**	**2,48**
Cl	[%]	0,03	0,16	**0,80**	0,27
NO3	[%]	0,11	**0,63**	**2,56**	**0,80**
Ca	[%]	**0,68**	**1,94**	**0,52**	**0,96**
Mg	[%]	0,11	0,05	0,07	0,04
K	[%]	0,03	0,18	0,28	0,07
Na	[%]	0,06	**0,69**	**1,46**	0,32
Ionen gesamt	[%]	3,0	10,3	7,2	4,9

931116 / C4-II1-1	Nordwand / 2. Gewölbe	Putzschicht ü. Bitumen (`74)
931116 / C4-I2-1	Nordwand / 1. Gewölbe	Tünchesch. üb. Boden,
		2 Schwarzsch. eingeschl.
931116 / C4-II1-2	Nordwand / 2. Gewölbe	Übergangsb. Neuputz/Bitu-
		men / Altputz, Kämpferpl.
931116 / C4-IB-1	ordwand / 2. Wandber	Neup. auf Altp., ob. Grenz-
		bereich Bitumensch. 1970
931116 / C4-I3-3	Nordwand / 3. Gewölbe	Angleichsputz unter neuer
		Bitumensch., tw. Alttüncher.
931116 / C4-IIC-1	Nordwand / 2. Gewölbe	Salzausblüh. auf Absatz
931116 / C4-IIID-1	Nordwand / 3. Gewölbe	Salzausblüh. auf Absatz
931116 / C4-I3-1	Nordwand / 1. Gewölbe	rot eingefärbter Putz/Ziegel?
931116 / C4-I3-2	Nordwand / 1. Gewölbe	1. richtige Putzschicht??
931116 / C4-I4-1	Nordwand / 1. Gewölbe	Ausbesserungsputz
		Kämpferplatte

Datum		27.12.93	27.12.93
Probenummer	**C5**	931227-1W	931227-1D
Labornummer		C5-1W	C5-1D
Einwaage	[g/l]	1,239	9,341
Trockenverlust 105 C	[%]	57,3	2,8
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	15787	394
pH-Wert		*9,4*	*7,2*
SO4	[%]	62,5	0,4
Cl	[%]	0,2	0,2
NO3	[%]	0,1	1,2
Ca	[%]	0,2	0,4
Mg	[%]	0,1	0,0
K	[%]	0,3	0,1
Na	[%]	29,1	0,1
Ionen gesamt	[%]	92,5	2,5

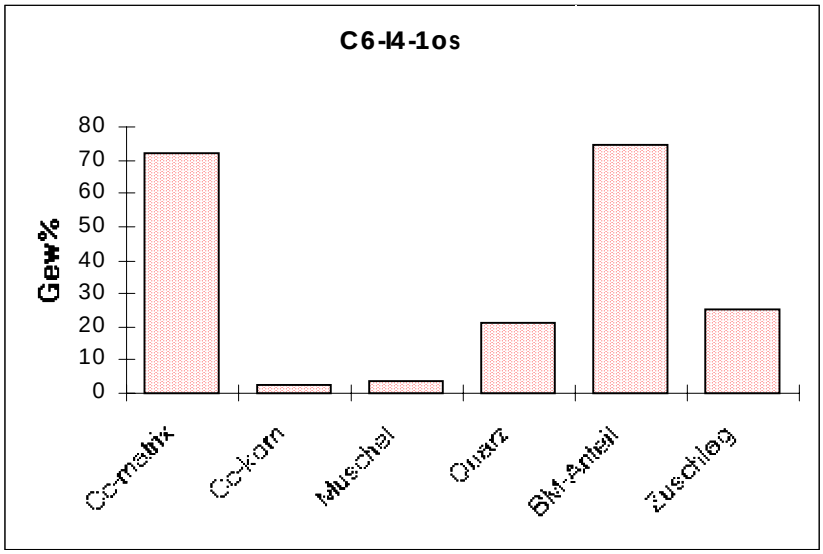
931227 / C5-IW (os)	Mauer üb 1. Gewölbe	Salzausblühungen
931227 / C5-ID (os)	1. Gewölbe, Westseite	Mörtelreste

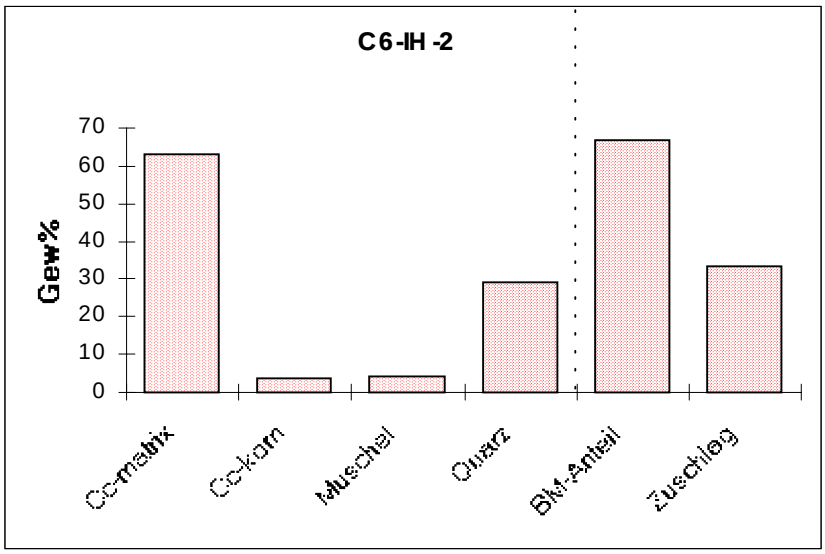
Datum		17.05.94	17.05.94	17.05.94		17.05.94	17.05.94
Probenummer	**C6**	C6-I4-1os	C6-I4-1us	C6-I3-1os	C6-I6-4(us)	C6-Iges	C6-I4-2cm
Labornummer		9	10	11	12	13	14
Einwaage	[g/l]	10,124	8,374	10,100	i. Sorption	8,360	3,866
Trockenverlust 105 C	[%]	1,9	1,2	2,4		1,6	8,7
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	817	368	651		749	1459
pH-Wert		7,7	7,6	7,3		7,3	6,8
SO4	[%]	2,5	0,1	0,7		2,0	3,2
Cl	[%]	0,3	0,4	0,6		0,4	1,0
NO3	[%]	1,2	0,8	1,8		0,9	2,7
Ca	[%]	1,2	0,3	0,6		0,9	1,6
Mg	[%]	0,1	0,0	0,1		0,1	0,2
K	[%]	0,3	0,2	0,4		0,3	0,0
Na	[%]	0,2	0,2	0,2		0,2	0,5
Ionen gesamt	[%]	5,6	1,9	4,4		4,7	9,2

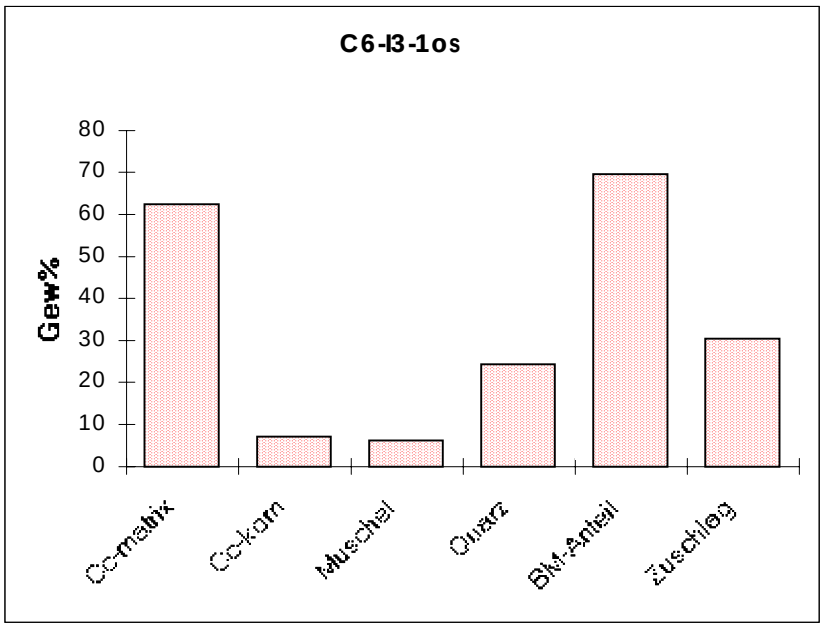
Datum		17.05.94	17.05.94	09.06.94	09.06.94	09.06.94	09.06.94
Probenummer		C6-Isw-os	C6-IA-2os	C6-IA-2os	C6-I6-5us	C6-IA-1os	C6-I6-1
Labornummer		15	16 ges.	16 a (zi)	17	18	19
Einwaage	[g/l]	10,530	12,480	9,584	6,644	1,263	9,487
Trockenverlust 105 C	[%]	3,9	4,8	8,0	1,7	1,7	5,9
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	332	108	451	813	10372	1520
pH-Wert		6,7	6,9	7,4	7,8	7,7	7,2
SO4	[%]	0,13	0,06	1,73	2,36	50,08	7,74
Cl	[%]	0,34	0,10	0,09	0,36	0,10	0,41
NO3	[%]	0,81	0,03	0,09	0,72	0,07	0,90
Ca	[%]	0,22	0,04	0,49	0,98	0,64	2,93
Mg	[%]	0,01	0,02	0,04	0,08	0,11	0,15
K	[%]	0,05	0,01	0,02	0,28	0,28	0,07
Na	[%]	0,23	0,13	0,19	0,17	16,23	0,23
Ionen gesamt	[%]	1,8	0,4	2,7	5,0	67,5	12,4

9	**940321 / C6-I4-1(os)**	1. Gewölbeoberseite	Fugenmörtel
10	**940321 / C6-I4-1(us)**	1. Gewölbeunterseite	Fugenmörtel
11	**940321 / C6-I3-1(os)**	1. Gewölbeoberseite	hist. Kalkmörtel
12	**940321 / C6-I6-4(us)**	1. Gewölbeunterseite	Putz auf Ziegel (Pr.6)
13	**940321 / C6-Iges**	1. Gewölbeunterseite	Schichtpaket mit Gotta
14	**940321 / C6-IH-2cm**	Wand H, Empore	versint. Putz auf Ziegel (Pr.1)
15	**940321 / C6-Isw-os**	1. Gewölbeoberseite	Verfüllschutt, SW-Zwickelb.
16	**940321 / C6-IA-2(os)**	1. Gewölbeoberseite	Schutt auf Wandabsatz
		Wand A	
17	**940321 / C6-I6-5(us)**	1. Gewölbeunterseite	Putz auf Ziegel, (Pr.2)
18	**940321 / C6-IA-1(os)**	1. Gewölbeoberseite	Salzausblühungen, Wand A
		Wand A	über Zuganker
19	**940321 / C6-I6-1**	1. Gewölbeunterseite	looser Putz und Ziegel

Historische Mörtel Campen (Analyse inclusive mikroskop. Auszählverf.):







Kloster Lüne:

Salzanalyse

Kloster Lüne, Salzanalyse (Ausblühungen)

Sommerremter, Refektorium

Datum		25.08.93	25.08.93	25.08.93	25.08.93	25.08.93
Probenummer		93081801	93081802	93081803	93081804	93081805
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
SO4	[mg/g]	103,19	231,10	34,14	15,18	75,07
Cl	[mg/g]	1,56	0,39	3,94	24,16	23,14
NO3	[mg/g]	20,62	0,61	5,33	8,38	7,74
Ca	[mg/g]	37,19	15,89	25,23	7,11	27,30
Mg	[mg/g]	0,36	37,28	9,19	0,66	1,83
K	[mg/g]	7,90	22,89	6,43	2,36	1,33
Na	[mg/g]	1,34	1,12	20,25	13,28	12,14

1	Sommerremter / Küche	Mörtel (Gips), brüchig
2	Sommerremter	Putz, Ausblühungen
3	Sommerremter	Ausblüh. pulv./pudrig
4	Sommerremter	Klinker, mürbe
5	Sommerremter	Ausblüh. fest - tw. pudr.

Datum		31.08.93	31.08.93	31.08.93	31.08.93	31.08.93
Probenummer		93081806	93081807	93081808	93081809	93081810
		6	**7**	**8**	**9**	**10**
SO4	[mg/g]	0,66	0,51	0,91	8,65	89,16
Cl	[mg/g]	570,70	546,32	81,86	456,91	95,53
NO3	[mg/g]	3,25	2,70	57,47	4,06	7,83
Ca	[mg/g]	3,95	3,61	19,19	7,64	33,93
Mg	[mg/g]	2,26	2,71	1,05	1,90	0,35
K	[mg/g]	2,75	3,64	15,98	3,05	2,03
Na	[mg/g]	392,01	343,43	38,37	283,05	63,69

6	Sommerremter	Ausblüh. fasrig / flaumig
7	Sommerremter	Ausblüh. fasrig / flaumig
8	Sommerremter	Ausblüh. / Farbsch. pudrig
9	Sommerremter	Salzkruste fest haftend
10	Sommerremter	Putz / Farbschicht mürbe

Datum		06.09.93	06.09.93	06.09.93	06.09.93	06.09.93
Probenummer		93081811	93081812	93081813	93081814	93081815
		11	**12**	**13**	**14**	**15**
SO4	[mg/g]	113,56	61,96	141,04	13,34	27,75
Cl	[mg/g]	3,61	3,25	1,24	4,98	7,99
NO3	[mg/g]	10,14	28,33	5,78	435,62	173,10
Ca	[mg/g]	25,06	15,35	47,84	9,81	11,07
Mg	[mg/g]	19,07	8,79	2,52	0,59	1,53
K	[mg/g]	0,46	16,81	0,52	263,45	143,19
Na	[mg/g]	2,70	3,53	0,61	4,19	5,55

11	Refektorium	vw. Kalktünche weißgelb
12	Refektorium	vw. Kalktünche weißgelb
13	Refektorium	Ausblüh. krümel. fest
14	Refektorium	Salzflaum hängend
15	Refektorium	Ausblüh. a. schwarz. Schicht

Datum		06.09.93	10.09.93	10.09.93	10.09.93	10.09.93
Probenummer		93081816	93081817	93081818	93081819	93081820
		16	**17**	**18**	**19**	**20**
SO4	[mg/g]	63,20531	81,04	3,85	7,16	70,92
Cl	[mg/g]	5,841631	15,33	12,47	13,99	10,85
NO3	[mg/g]	324,0398	14,96	13,38	32,33	44,42
Ca	[mg/g]	23,945	29,93	6,07	4,61	28,18
Mg	[mg/g]	0,806069	2,52	0,41	0,06	3,08
K	[mg/g]	292,935	5,32	0,66	15,27	23,68
Na	[mg/g]	3,698435	11,41	7,94	8,97	6,94

16	Refektorium	Salzflaum a. Ziegel
17	Refektorium A	Salzanreich. a. Tünche
18	Refektorium A	Ausblüh. flaum. a. Ziegel
19	Refektorium A	Tünche / Ausblüh. pudrig
20	Refektorium A	Tünche / Ausbl. plattig fest

Datum		10.09.93	10.09.93	10.09.93	10.09.93	10.09.93
Probenummer		93081821	93081822	93081823	93081824	93081825
		21	**22**	**23**	**24**	**25**
SO4	[mg/g]	492,86	129,10	204,39	12,34	1,68
Cl	[mg/g]	7,95	2,54	2,27	17,64	11,11
NO3	[mg/g]	9,33	2,28	2,97	18,51	2,93
Ca	[mg/g]	184,82	46,34	72,92	8,59	1,29
Mg	[mg/g]	8,88	0,72	1,67	0,70	0,04
K	[mg/g]	16,83	0,83	1,56	3,52	0,90
Na	[mg/g]	8,04	1,31	1,50	10,82	6,83

21	Refektorium A	Ausblüh. pudrig tw. fest
22	Refektorium A	hohlliegender Putz
23	Refektorium A	Putz mürbe
24	Kreuzgang A	Kalktünche a. Ziegel
25	Kreuzgang C	"Zement"putz a. Ziegel

Datum		10.09.93	10.09.93
Probenummer		93081826	93081827
		26	**27**
SO4	[mg/g]	0,15	0,26
Cl	[mg/g]	8,80	14,93
NO3	[mg/g]	1,17	2,80
Ca	[mg/g]	0,67	3,07
Mg	[mg/g]	0,59	0,26
K	[mg/g]	0,30	0,15
Na	[mg/g]	4,79	8,26

26	Kreuzgang C	Tünche , Ausblüh., Ziegel
27	Kreuzgang C	Tünche abblätternd pudrig

Kloster Lüne Schnitt 1:

Spiralbohrung, Salzgehalt

Datum		15.12.93	15.12.93	15.12.93	15.12.93	15.12.93	15.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		**1 1.1**	**1 1.2**	**1 1.3**	**1 1.4**	**1 1.5**	**1 1.6**
Einwaage	[g/l]	5,686	12,526	19,394	30,316	35,538	40,426
Trockenverlust 105 C	[%]	2,2	0,7	1,8	0,3	0,3	0,5
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	33	13	12	5	4	4

Datum		16.12.93	16.12.93	16.12.93	16.12.93	16.12.93	16.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		**1 2.1**	**1 2.2**	**1 2.3**	**1 2.4**	**1 2.5**	**1 2.6**
Einwaage	[g/l]	16,796	19,114	16,738	8,160	7,248	10,728
Trockenverlust 105 C	[%]	1,5	1,2	0,8	4,6	2,4	1,3
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	44	204	183	222	235	137
SO4	[mg/g]	1,10	0,99	8,93	10,18	10,49	5,57
Cl	[mg/g]	0,10	0,04	0,14	0,16	0,21	0,10
NO3	[mg/g]	0,00	0,07	0,11	1,06	0,17	0,09
Ca	[mg/g]	0,77	3,62	3,11	3,35	3,66	2,01
Mg	[mg/g]	0,13	0,16	0,17	0,12	0,14	0,17
K	[mg/g]	0,25	0,22	0,24	0,50	0,58	0,38
Na	[mg/g]	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00

Datum		20.12.93	20.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü
Labornummer		**1 3.2**	**1 3.2**
Einwaage	[g/l]	19,957	18,210
Trockenverlust 105 C	[%]	1,2	0,9
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	302	192
SO4	[mg/g]	15,88	9,64
Cl	[mg/g]	0,08	0,11
NO3	[mg/g]	0,10	0,10
Ca	[mg/g]	5,40	3,09
Mg	[mg/g]	0,50	0,07
K	[mg/g]	0,18	0,12
Na	[mg/g]	0,00	0,10

Datum		20.12.93	20.12.93	20.12.93	20.12.93	20.12.93	20.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		**1 4.1**	**1 4.2**	**1 4.3**	**1 4.4**	**1 4.5**	**1 4.6**
Einwaage	[g/l]	18,320	11,154	27,878	9,564	12,776	31,704
Trockenverlust 105 C	[%]	0,4	0,7	0,5	0,8	0,5	0,4
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	10	12	8	28	11	7

Datum		03.01.94	03.01.94	03.01.94	03.01.94	03.01.94	03.01.94
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		**1 5.1**	**1 5. 2**	**1 5.3**	**1 5.4**	**1 5.5**	**1 5.6**
Einwaage	[g/l]	11,066	15,386	23,118	17,754	24,978	28,070
Trockenverlust 105 C	[%]	0,7	1,2	0,8	2,4	0,5	0,6
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	191	212	126	89	55	80
SO4	[mg/g]	8,45	9,98	5,88	3,28	1,92	3,62
Cl	[mg/g]	0,16	0,14	0,07	0,12	0,18	0,08
NO3	[mg/g]	0,18	0,26	0,15	0,20	0,03	0,04
Ca	[mg/g]	3,18	3,50	2,06	1,30	0,82	1,25
Mg	[mg/g]	0,10	0,09	0,11	0,05	0,02	0,06
K	[mg/g]	0,36	0,24	0,15	0,22	0,16	0,14
Na	[mg/g]	0,10	0,12	0,06	0,07	0,10	0,04

Datum		06.01.94	06.01.94	06.01.94	06.01.94	06.01.94
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		**1 6.1**	**1 7.2**	**1 7.1**	**1 8**	**1 9**
Einwaage	[g/l]	10,154	9,641	9,998	12,244	11,918
Trockenverlust 105 C	[%]	8,7	13,8	14,6	9,2	18,0
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	1757	1978	1771	130	1403
SO4	[mg/g]	128,42	147,70	114,52	5,70	93,89
Cl	[mg/g]	0,14	0,15	0,19	0,10	0,51
NO3	[mg/g]	0,18	0,62	0,70	0,11	0,61
Ca	[mg/g]	43,28	52,33	44,41	1,84	35,20
Mg	[mg/g]	0,72	0,49	0,56	0,33	0,66
K	[mg/g]	0,39	0,41	0,39	0,34	0,33

Kloster Lüne Schnitt 2:

Spiralbohrung, Salzgehalt

Datum		08.12.93	08.12.93	08.12.93	08.12.93	08.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		2 1.1	2 1.2	2 1.3	2 1.4	2 1.5
Einwaage	[g/l]	20,046	18,008	15,652	24,348	15,809
Trockenverlust 105 C	[%]	0,2	3,3	0,3	0,3	0,2
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	10,58	11,55	4,82	4,18	3,80

Datum		09.12.93	09.12.93	09.12.93	09.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		2 2.1	2 2.2	2 2.3	2 2.4
Einwaage	[g/l]	10,644	23,904	19,13	42,07
Trockenverlust 105 C	[%]	0,2	0,8	0,08	0,23
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	6,88	4,78	4,91	3,49

Datum		09.12.93	09.12.93	09.12.93	09.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		2 3.1	2 3.2	2 3.3	2 3.4
Einwaage	[g/l]	9,17	10,02	9,94	9,99
Trockenverlust 105 C	[%]	15,05	6,14	3,70	4,47
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	2867,42	1781,26	1022,44	880,53
SO4	[mg/g]	203,05	114,26	53,69	43,58
Cl	[mg/g]	1,56	1,80	1,75	1,95
NO3	[mg/g]	2,28	2,19	2,46	2,80
Ca	[mg/g]	74,03	42,51	19,87	15,89
Mg	[mg/g]	4,47	0,84	0,27	0,21
K	[mg/g]	0,37	0,05	0,39	0,68
Na	[mg/g]	1,25	1,50	1,21	1,50

Datum		14.12.93	14.12.93	14.12.93	14.12.93
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		2 4.1	2 4.2	2 4.3	2 4.4
Einwaage	[g/l]	40,32	10,27	12,528	22,17
Trockenverlust 105 C	[%]	0,29	0,54	0,65	1,04
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	33,68	42,55	49,33	37,71
SO4	[mg/g]	1,12	0,62	1,07	0,99
Cl	[mg/g]	0,03	0,01	0,15	0,11
NO3	[mg/g]	0,09	0,05	0,15	0,02
Ca	[mg/g]	0,43	0,64	0,66	0,57
Mg	[mg/g]	0,03	0,07	0,07	0,05
K	[mg/g]	0,04	0,38	0,27	0,17
Na	[mg/g]	0,07	0,00	0,12	0,06

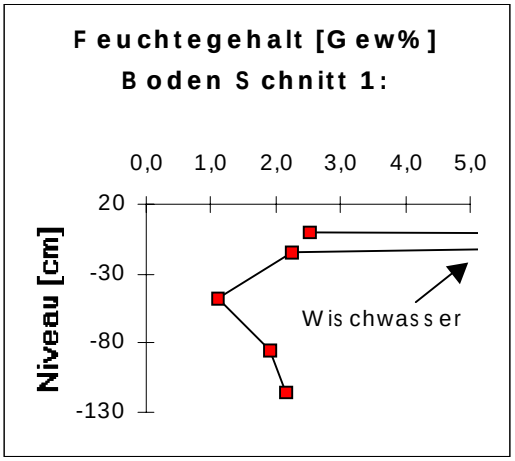
Datum		10.01.94	10.01.94
Probenummer		931125/lü	931125/lü
Labornummer		2 1a	2 1b
Einwaage	[g/l]	10,017	9,991
Trockenverlust 105 C	[%]	5,7	11,9
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	1199	1365
SO4	[mg/g]	75,02	63,91
Cl	[mg/g]	0,02	2,21
NO3	[mg/g]	0,31	2,84
Ca	[mg/g]	26,50	30,38
Mg	[mg/g]	1,20	1,05
K	[mg/g]	0,40	0,26
Na	[mg/g]	0,00	1,25

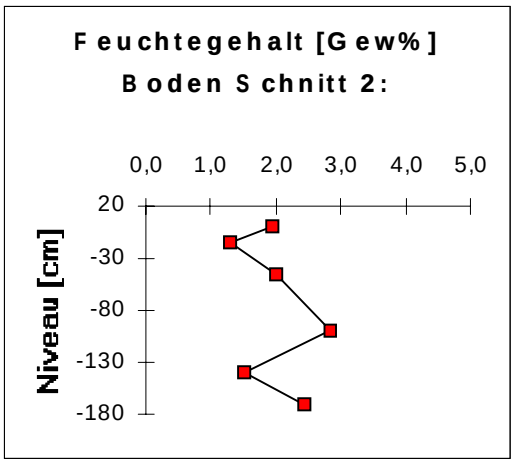
Kloster Lüne Schnitt 3:

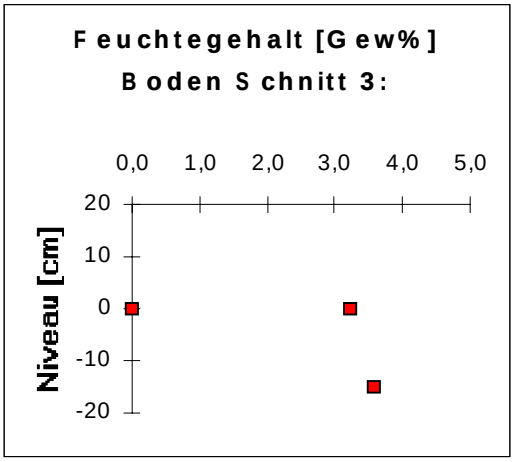
Spiralbohrung, Salzgehalt

Datum		10.01.94	10.01.94	10.01.94
Probenummer		931125/lü	931125/lü	931125/lü
Labornummer		**3 1**	**3 2**	**3 3**
Einwaage	[g/l]	9,040	8,473	4,027
Trockenverlust 105 C	[%]	16,3	11,9	10,5
Leitfähigkeit	[µS*dm2/g]	1137	1618	2091
SO4	[mg/g]	59,46	97,07	119,72
Cl	[mg/g]	1,10	0,22	0,25
NO3	[mg/g]	2,36	0,83	1,05
Ca	[mg/g]	22,73	37,77	40,60
Mg	[mg/g]	0,46	2,01	1,56
K	[mg/g]	0,39	0,44	1,03
Na	[mg/g]	0,72	0,30	0,31

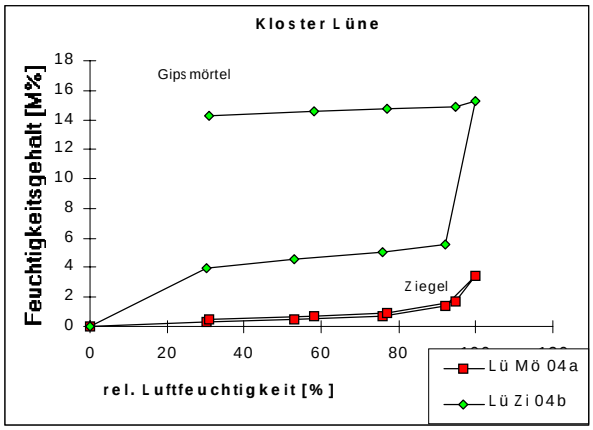
Spiralbohrung Kloster Lüne, Feuchtegehalte:

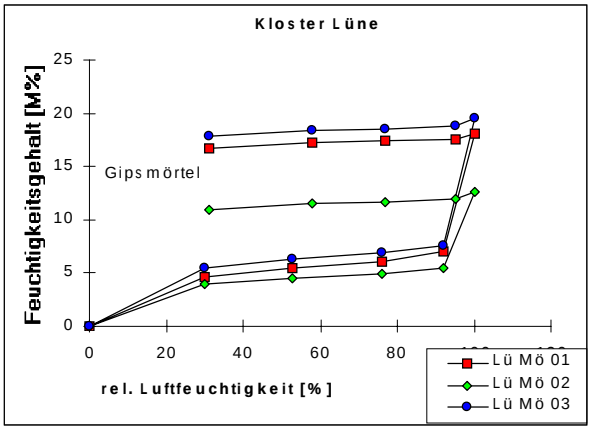


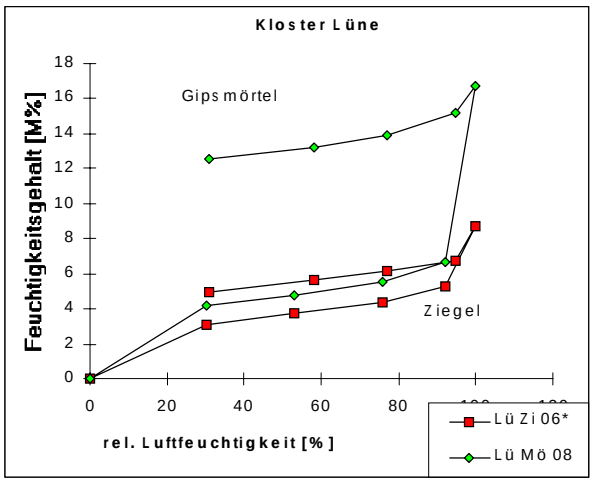




Sorptionsisothermen von Gipsmörtel- und Ziegelproben nach 105°C-Trocknung:

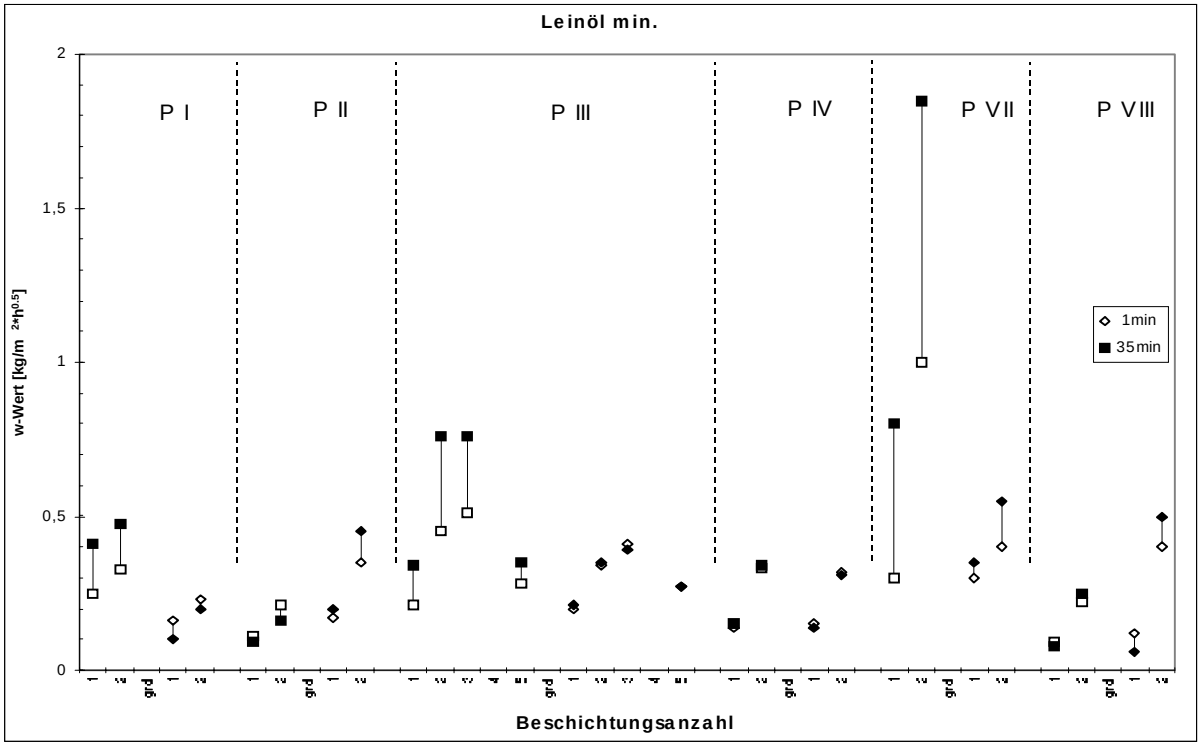




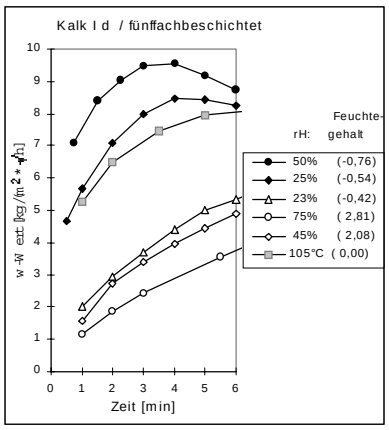


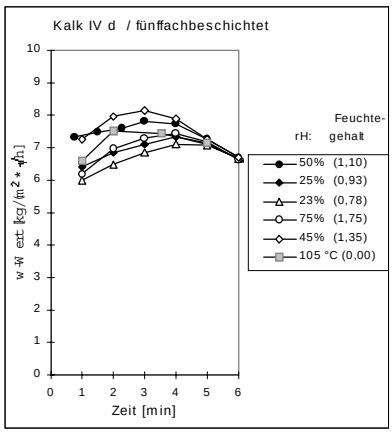
Mörtelanalyse Kloster Lüne:					
Probennummer		94041401	94041402	94041404	94041408
Labornummer		Lü01	Lü02	Lü04	Lü08
Einwaage	[g]	3,049	3,075	3,007	3,008
Trockenverlust 40°C	[%]	0,5	0,6	0,5	0,6
Trockenverlust 240°C	[%]	16,0	13,0	13,4	15,0
CaSO4*2H2O	[%]	76,4	61,9	63,9	71,7
CaCO3	[%]	21,5	28,9	30,5	26,3
SiO2-lösl.	**[%]**	**0,8**	**3,5**	**1,7**	**0,8**
Zuschlag	**[%]**	**1,4**	**5,6**	**3,9**	**1,3**
Bm/Zuschl.	**1:**	**0,01**	**0,06**	**0,04**	**0,01**
Gesamtmenge [%]		100	100	100	100

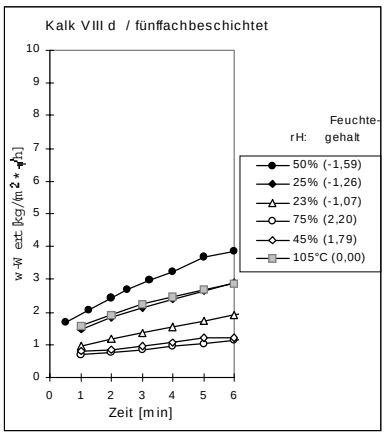
Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Verbundsysteme Putz a / Leinöl min. und Putz a / Leinöl min. grundiert:

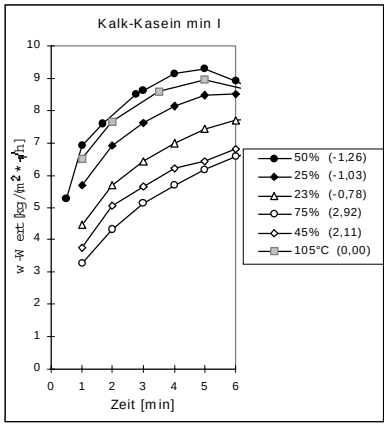


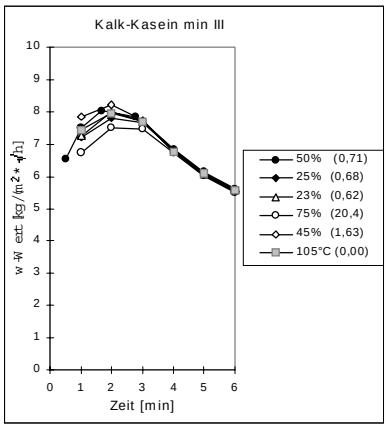
Klimaabhängigkeit der kapillaren Wasseraufnahme (Verbundsysteme Putz/Beschichtung)

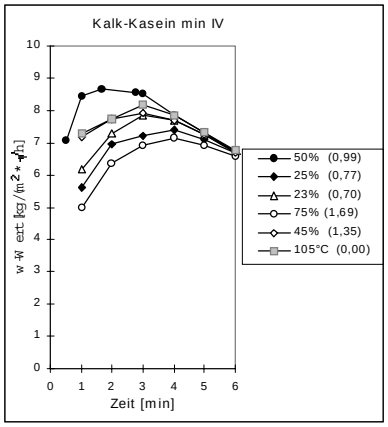


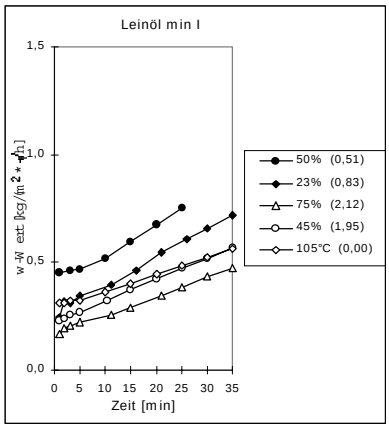


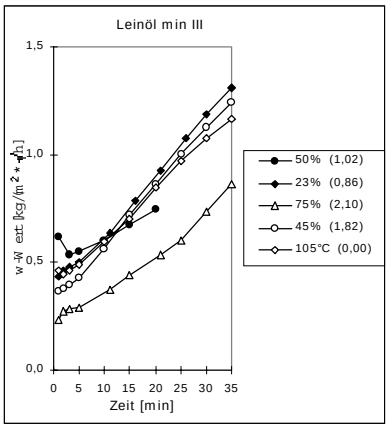


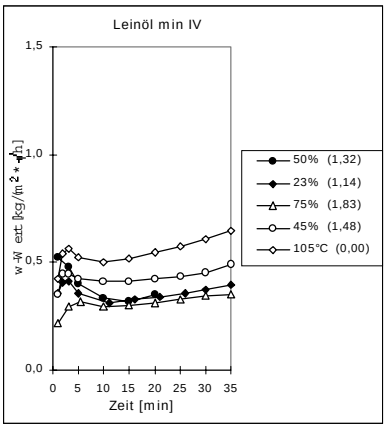

Kalk-Kasein min I
w-W ert [kg/m²*√h]
Zeit [min]
50% (-1,26)
25% (-1,03)
23% (-0,78)
75% (2,92)
45% (2,11)
105°C (0,00)

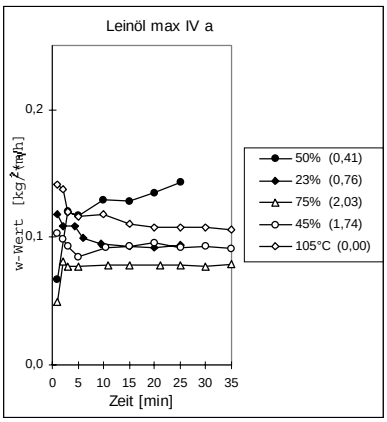

Kalk-Kasein min III
w-W ert [kg/m²*√h]
Zeit [min]
50% (0,71)
25% (0,68)
23% (0,62)
75% (20,4)
45% (1,63)
105°C (0,00)


Kalk-Kasein min IV
w-W ert [kg/m²*√h]
Zeit [min]
50% (0,99)
25% (0,77)
23% (0,70)
75% (1,69)
45% (1,35)
105°C (0,00)

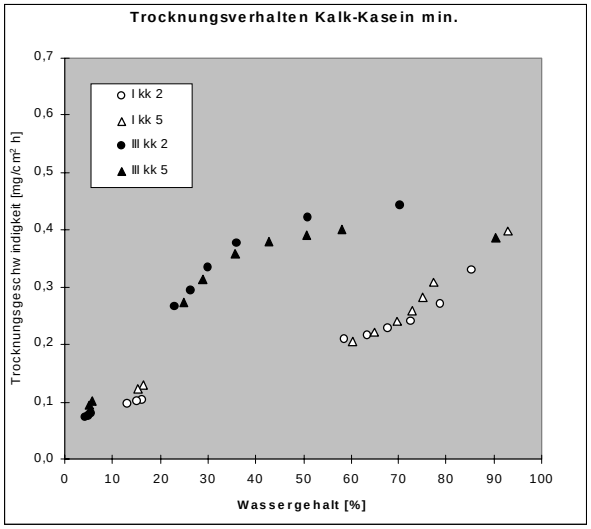

Leinöl min I
w-W ert [kg/m²*√h]
Zeit [min]
50% (0,51)
23% (0,83)
75% (2,12)
45% (1,95)
105°C (0,00)

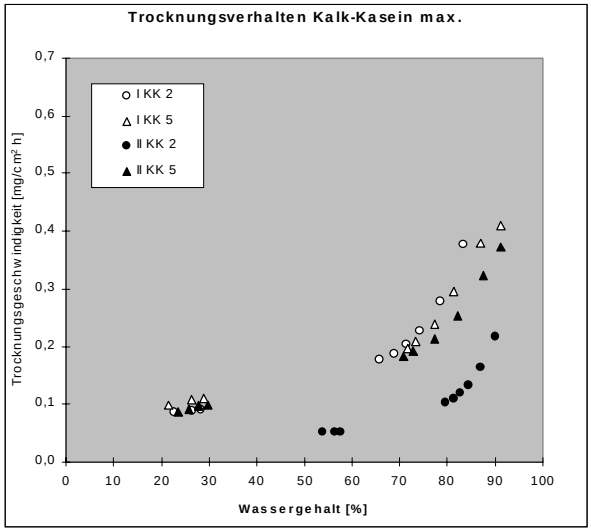

Leinöl min III
w-W ert [kg/m²*√h]
Zeit [min]
50% (1,02)
23% (0,86)
75% (2,10)
45% (1,82)
105°C (0,00)

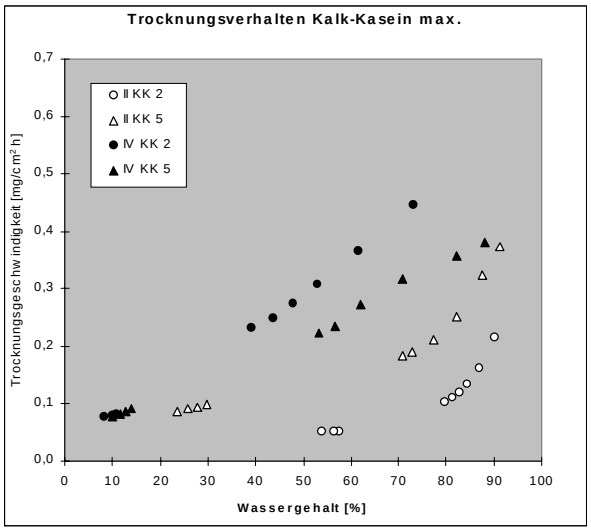

Leinöl min IV
w-W ert [kg/m²*√h]
Zeit [min]
50% (1,32)
23% (1,14)
75% (1,83)
45% (1,48)
105°C (0,00)


Leinöl max IV a
w-Wert [kg/m²*√h]
Zeit [min]
50% (0,41)
23% (0,76)
75% (2,03)
45% (1,74)
105°C (0,00)

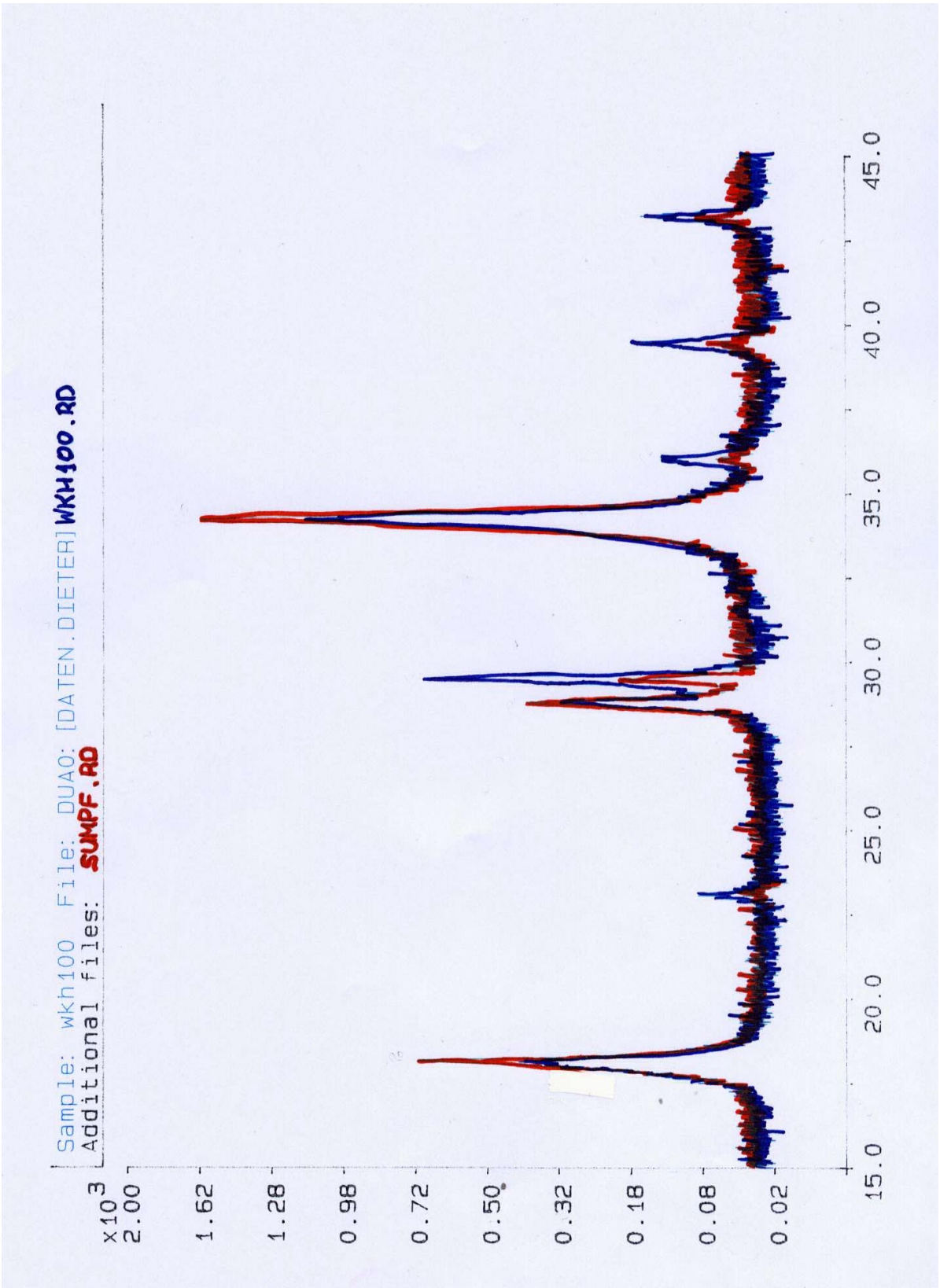
Trocknungsdiagramme beschichteter Putze:







Halbquantitativer röntgenografischer Vergleich der Zusammensetzung von frischem Weißkalkhydrat- Pulver und Sumpfkalk:



Lebenslauf

Persönliche Daten:

Barbara Blöchl-Wirts, geb. Blöchl
Bemeroderstr. 66
30 559 Hannover
geb.: 26.11.1962 Augsburg

Schulausbildung:

1969-1074	Herrenbachschule Augsburg
1974-1975	Peutinger Gymnasium Augsburg
1975-1980	Realschule Wiesmoor, erweiterter Realschulabschluß
1980-1983	IGS Aurich, Abitur

Hochschulausbildung:

1983-1993	Studium der Mineralogie, Universität Hannover
1993	Diplom, Thema der Diplomarbeit: *Physikalische und tonmineralogische Untersuchungen an ausgewählten Naturwerksteinen Norddeutschlands*.
Seit 1993	Promotionsarbeit, Universität Hannover, Institut für Mineralogie unter der Leitung von Prof. Dr. W. Johannes im Themenbereich: *Baustoffchemische und -physikalische Untersuchungen an Beschichtungssystemen auf Putzen und historischem Mauerwerk*. Forschung im Rahmen des durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten Projektes *Nutzen oder Schaden durch Freilegung historischer Wandmalereien im Sinne der Substanzerhaltung* am Institut für Denkmalpflege (NLVwA).