

**Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze:
Haftmörtel, Hinterfüllmörtel
und Kalkputze**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Karl Georg Böttger
aus Siegen

Weimar

Gutachter: 1. Prof. Dr. J. Stark
2. Prof. Dr. D. Knöfel
3. Prof. Dr. H. Budelmann

Tag der Disputation: 30.4.97

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Böttger, Karl Georg:

Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze / vorgelegt von Karl Georg Böttger. –Berlin : Logos-Verl., 1997

Zugl.: Weimar, Bauhaus-Univ., Diss., Diss., 1997

ISBN 3-931216-72-1

Copyright 1997 Logos Verlag Berlin
Alle Rechte vorbehalten

ISBN 3-931216-72-1

Logos Verlag Berlin
Hufelandstr. 34
10407 Berlin
Tel.: 030/42851090
INTERNET: <http://www.logos-verlag.de>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit „Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze“ soll einen Beitrag zur Erhaltung von Kalkputzen historischer Gebäude leisten. Sie behandelt die Entwicklung von Mörteln zur Randsicherung (Haftmörtel), zur Verfüllung hohl liegender Putzflächen (Hinterfüllmörtel) und von möglichst exakt den historischen Putzen nachgestellten Ersatzmörteln (Sandkalkmörtel).

Sie entstand in den Jahren von 1989 bis 1996 während meiner Tätigkeit im Labor für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-GH Siegen, angeregt durch Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. D. Knöfel. Ihm danke ich an dieser Stelle für die von ihm gewährte Unterstützung, seine ständige Diskussionsbereitschaft und persönliche Betreuung der Arbeit. Nicht zuletzt auch für den freundlichen Anstoß, doch noch einmal als externer Student in Weimar ein Hochschulstudium zu beginnen und abzuschließen.

Gleichfalls danke ich ganz besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Stark, Direktor des F. A. Finger Institutes für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar- Universität, für die Vergabe dieser Arbeit und seine stets wohlmeinende Unterstützung.

Frau Petra Ahrens, Herrn Matthias Born, Frau Margit Daub, Herrn Mostafa Deghani, Frau Fatemeh Doosdar, Frau Bärbel Dörr, Frau Tatjana Friedrich, Frau Monika Hoffmann, Frau Ingrid Hommel, Herrn Stephan Hübecker, Frau Katrin Mann, Frau Christiane Schäfer, Frau Andrea Schlabach, Frau Ursel Schwarz und meiner Frau Camilla Böttger bringe ich für ihre Hilfe beim praktischen Teil dieser Arbeit meinen Dank zum Ausdruck.

Herrn Dr. Ulf Boenkendorf, Herrn Dr. Werner Duttlinger, Herrn Siegbert Henkel, Herrn Dr. Bernd Middendorf, Frau Dr. Christiane Saalbach, Herrn Frank Winnefeld und Frau Johanna Schirmacher sei für ihre stete Diskussionsbereitschaft gedankt.

Ebenso danke ich allen bisher nicht genannten Mitarbeitern des Labors für Bau- und Werkstoffchemie, zum einen für ihre Hilfsbereitschaft, zum anderen für das gute Betriebsklima.

Schließlich möchte ich den Mitarbeitern des F. A. Finger Institutes für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar danken, die mir stets eine freundliche Unterstützung zuteil werden ließen.

Ohne die Unterstützung meiner Frau Camilla Böttger, die sowohl praktischer als auch theoretischer und seelischer Art war, begleitet von dem Verzicht auf Familienleben, wäre die Arbeit für mich nicht durchführbar gewesen.

Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mit freundlicher Anteilnahme das Entstehen dieser Arbeit unterstützten.

Abschließend möchte ich der Verwaltung der staatlichen Schlösser und Gärten Hessen, dem Hessischen Landesamt für Denkmalpflege und dem Bundesminister für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung der Arbeit danken.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	9
1 EINLEITUNG	13
2 LITERATURÜBERSICHT	15
2.1 Ursachen für Schäden an Putzen historischer Bauwerke	15
2.1.1 Einflüsse bei der Herstellung von Putzen	15
2.1.2 Umweltbedingte Ursachen für Putzschäden	17
2.1.2.1 Belastungen von Putzen durch physikalische Einflüsse	18
2.1.2.2 Belastung von Putzen durch chemische Einflüsse	20
2.1.2.3 Belastung von Putzen durch mikrobiologische Einflüsse	28
2.2 Ursachen für Schäden durch Restaurierungsmörtel	33
2.2.1 Allgemeines	33
2.2.2 Schäden durch Reaktionen mit Alkalisalzen	35
2.2.3 Schadensreaktionen mit Sulfaten	37
2.2.3.1 Gipsbildung	37
2.2.3.2 Ettringitbildung	38
2.2.3.3 Thaumasitbildung	43
2.2.4 Weitere Schadensreaktionen	45
2.2.4.1 Friedel´sches Salz	45
2.2.4.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)	46
2.3 Geeignete Bindemittel für Restaurierungsmörtel	46
3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN	49
3.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe	49
3.1.1 Dichtebestimmung	49
3.1.2 Spezifische Oberfläche nach Blaine	49
3.1.3 Lasergranulometrie	49
3.1.4 Chemische Zusammensetzung	49
3.1.5 Qualitative Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalyse	49
3.2 Frischmörteluntersuchungen	50
3.2.1 Ausbreitmaß	50
3.2.2 Wasserrückhaltevermögen	50
3.2.3 Fließverhalten	50
3.2.4 Penetrationsverhalten	50
3.2.5 Sedimentationsverhalten	51
3.2.6 Frischmörtelrohddichte	51
3.3 Festmörteluntersuchungen	52
3.3.1 Mechanische Eigenschaften und Frost-Tauwechsel-Widerstand	52
3.3.1.1 Elastizitätsmodul	52
3.3.1.2 Biegezugfestigkeit	52
3.3.1.3 Druckfestigkeit	52
3.3.1.4 Haftzugfestigkeit	52
3.3.1.5 Zugfestigkeit	53
3.3.1.6 Frost-Tauwechsel-Widerstand	53
3.3.2 Hygrische Eigenschaften	53
3.3.2.1 Schwinden in der Form	53

3.3.2.2	Hygrische Dehnung	54
3.3.2.3	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl.....	54
3.3.2.4	Sorptionsverhalten.....	55
3.3.2.5	Innere Oberfläche nach BET.....	55
3.3.2.6	Wasseraufnahme.....	56
3.3.2.7	Wasserabgabe.....	56
3.3.3	Ausblühverhalten	59
3.3.4	Sulfatwiderstand.....	59
3.3.5	Quecksilber-Druckporosimetrie	59
3.3.6	Wärmedehnungskoeffizient.....	60
3.4	Chemisch-mineralogische Untersuchungen.....	61
3.4.1	Mörtelzusammensetzung nach Wisser/Knöfel.....	61
3.4.2	Siebanalysen	61
3.4.3	Bestimmung des Gehaltes an wasserlöslichen Salzen.....	61
3.4.4	Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalyse.....	62
3.4.5	Mikroskopische Untersuchungen	62
3.4.6	Mengenmäßige Abschätzung mittels Vergleichsschaubildern.....	62
4	UNTERSUCHUNG HISTORISCHER KALKPUTZMÖRTEL.....	65
4.1	Beprobte Objekte	65
4.1.1	Torhalle in Lorsch	65
4.1.2	Einhardbasilika in Steinbach.....	68
4.1.3	Magdeburger Dom	70
4.1.4	Ehemaliges Zisterzienserkloster Heydau.....	73
4.2	Untersuchungen der historischen Kalkputzmörtel.....	75
4.2.1	Qualitative Phasenbestimmung.....	75
4.2.2	Bestimmung der Mörtelzusammensetzung nach Wisser/Knöfel.....	79
4.2.3	Bestimmung des Gehaltes wasserlöslicher Salze.....	82
4.2.4	Mechanische Eigenschaften.....	82
4.2.5	Hygrische Eigenschaften	83
4.2.6	Hg-Druckporosimetrie.....	85
4.3	Zusammenfassung zu Kapitel 4.....	86
5	ENTWICKLUNG VON HAFTMÖRTELN FÜR DIE RESTAURIERUNG HISTORISCHER KALKPUTZE.....	89
5.1	Einleitung	89
5.2	Anforderungsprofil an die Haftmörtel.....	89
5.3	Verwendete Materialien.....	90
5.3.1	Bindemittel und Zusätze	90
5.3.2	Zuschlag.....	90
5.3.3	Zusatzmittel.....	91
5.3.4	Untersuchungsmethoden.....	91
5.3.5	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper	92
5.4	Ergebnisse der Voruntersuchungen	93
5.4.1	Zusammensetzung der Haftmörtel der Vorversuche	93
5.4.2	Frischmörteluntersuchungen	93
5.4.3	Festmörteluntersuchungen	93
5.4.3.1	Mechanische Eigenschaften.....	93
5.4.3.2	Hygrische Eigenschaften	94
5.4.3.3	Sulfatwiderstand.....	94

5.4.4	Zusammenfassung der Voruntersuchungen	95
5.5	Ergebnisse der Hauptuntersuchungen.....	96
5.5.1	Zusammensetzung der Haftmörtel der Hauptuntersuchungen	96
5.5.2	Frischmörteluntersuchungen	96
5.5.3	Festmörteluntersuchungen	97
5.5.3.1	Mechanische Eigenschaften.....	97
5.5.3.2	Hygrische Eigenschaften	99
5.5.3.3	Ausblühverhalten	102
5.5.3.4	Frost-Tauwechsel-Widerstand	102
5.5.3.5	Applikation der Haftmörtel an Musterflächen.....	103
5.6	Zusammenfassung zu Kapitel 5	103
6	ENTWICKLUNG VON HINTERFÜLLMÖRTELN FÜR DIE RESTAURIERUNG HISTORISCHER KALKPUTZE	105
6.1	Einleitung	105
6.2	Anforderungsprofil an Hinterfüllmörtel	106
6.3	Verwendete Materialien.....	107
6.3.1	Bindemittel	107
6.3.2	Zuschlag.....	107
6.3.3	Zusätze.....	107
6.3.4	Untersuchungsmethoden.....	108
6.4	Untersuchungsergebnisse der Voruntersuchungen.....	109
6.4.1	Zusammensetzung der Hinterfüllmörtel der Vorversuche	109
6.4.2	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper, Anlage von Musterflächen.	110
6.4.3	Frischmörteluntersuchungen	111
6.4.3.1	Optimierung der Frischmörteleigenschaften.....	111
6.4.3.2	Frishmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel der Vorversuche.....	111
6.4.4	Festmörteluntersuchungen	112
6.4.4.1	Hygrische Eigenschaften	112
6.4.4.2	Mechanische Eigenschaften.....	112
6.4.4.3	Ausblühverhalten	114
6.4.4.4	Zusätzliche Prüfungen ausgewählter Hinterfüllmörtel.....	114
6.4.4.5	Prüfung des Verbundes der Hinterfüllmörtel an den Musterflächen.....	115
6.4.5	Zusammenfassung der Voruntersuchungen	116
6.5	Untersuchungsergebnisse der Hauptuntersuchungen	117
6.5.1	Zusammensetzung der Hinterfüllmörtel der Hauptuntersuchungen	117
6.5.2	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper	119
6.5.3	Frishmörteluntersuchungen	120
6.5.3.1	Konsistenz.....	120
6.5.4	Festmörteluntersuchungen	121
6.5.4.1	Mechanische Eigenschaften.....	121
6.5.4.2	Hygrische Eigenschaften	122
6.5.4.3	Ausblühverhalten	126
6.5.4.4	Frost-Tauwechsel-Widerstand	126
6.5.4.5	Thermische Dehnung	126
6.5.4.6	Sorptionsverhalten.....	126
6.5.4.7	Innere Oberfläche nach BET.....	129
6.5.4.8	Hg-Druckporosimetrie.....	129
6.5.4.9	Applikation der Hinterfüllmörtel an Musterflächen.....	132
6.6	Zusammenfassung zu Kapitel 6.....	132

7	ENTWICKLUNG VON KALKPUTZEN FÜR DIE RESTAURIERUNG HISTORISCHER KALKPUTZE.....	137
7.1	Einleitung	137
7.2	Anforderungsprofil an die Kalkputze.....	138
7.3	Verwendete Materialien.....	139
7.3.1	Bindemittel.....	139
7.3.2	Zuschlag.....	139
7.3.3	Zusätze.....	140
7.3.4	Zusammensetzung der Sandkalkmörtel und Kalkmörtel.....	141
7.3.5	Herstellung der Sandkalkmörtel	141
7.3.6	Herstellung der Kalkmörtel.....	142
7.3.7	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper, Anlage von Muster- flächen.....	143
7.3.8	Untersuchungsmethoden.....	143
7.4	Untersuchungsergebnisse.....	144
7.4.1	Frismörteluntersuchungen	144
7.4.2	Festmörteluntersuchungen	145
7.4.2.1	Mechanische Eigenschaften.....	145
7.4.2.2	Hygrische Eigenschaften.....	149
7.4.2.3	Mikroskopische Untersuchungen	154
7.4.2.4	Ausblühverhalten	157
7.4.2.5	Thermische Dehnung	157
7.4.2.6	Frost-Tauwechsel-Widerstand	157
7.4.2.7	Sorptionsverhalten.....	157
7.4.2.8	Innere Oberfläche nach BET.....	158
7.4.2.9	Bestimmung des Kalkspatzen-Anteils.....	158
7.4.2.10	Hg-Druckporosimetrie.....	158
7.4.2.11	Applikation der Kalkputze an Musterflächen.....	161
7.5	Zusammenfassung zu Kapitel 7.....	161
8	ZUSAMMENFASSUNG	165
9	LITERATURVERZEICHNIS	169
10	ANHANG	191

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

AAS	Atomabsorptionsspektroskopie
AFm	Calciumaluminiumeisenmonosulfat
AFt	Calciumaluminiumeisen-trisulfat
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
AM	Ausbreitmaß
α_T	Wärmedehnungskoeffizient
B/Z	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis
B/Z _{Ca(OH)₂}	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf Ca(OH) ₂ als Bindemittel
B/Z _{CaCO₃}	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf CaCO ₃ als Bindemittel
B/Z _{CaO}	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf CaO als Bindemittel
BAM	Bundesanstalt für Materialprüfung
Blaine	spez. Oberfläche nach der Blaine-Methode bestimmt
BVK	Borosilikat-Vollglaskugeln
β'	Stoffübergangskoeffizient
CL 90, 80, 70	Weißkalk mit 90, 80, 70 M.-% CaO und MgO
CL90/1	Branntstückkalk CL 90, 1. Lieferung
CL90/2	Branntstückkalk CL 90, 2. Lieferung
CL90/3	Branntstückkalk CL 90, 3. Lieferung
Δ_T	Zeitraum zwischen 2 Trocknungszeitpunkten
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
E _{dyn}	dynamischer E-Modul
Em	Emulgator für PUR
ε	Dehnung
ε_q	Quellen (hygrisches Quellen)
ε_s	Schwinden (hygrisches Schwinden)
ε_{s1}	1. Schwinden (chemisches- und Trocknungsschwinden)
ε_{s2}	2. Schwinden (hygrisches Schwinden)
ε_{sF}	Schwinden in der Form - chemisches Schwinden (Bindemittel mit hydraulischen Anteilen) bzw. Trocknungsschwinden (Bindemittel ohne Hydraulefaktoren)
ε_u	Sorptionsdehnung, Dehnung durch Feuchteaufnahme bei der Bestimmung der Sorptionsisothermen
F10	Verflüssiger für Kalkmörtel, pulverförmig
FM	Fließmittel für Hinterfüllmörtel, pulverförmig
FTIR	Fourier Transformations Infrarot Spektroskopie
FTW	Frost-Tauwechsel-Widerstand
GT	Gewichtsteile

HGK	Borosilikat-Hohlglaskugeln
HGZ	Sulfathüttenzement zusammengesetzt aus 83 M.-% HüS, 10 M.-% Gips und 7 M.-% PZ
HHK	hochhydraulischer Kalk
HK	hydraulischer Kalk
HL 2, 3,5 5	hydraulischer Kalk mit einer Druckfestigkeit von 2, 3,5, 5 N/mm ² im Alter von 28 Tagen
HOZ 35 F	CEM III/A 32,5 R
HOZ	Hochofenzement HOZ 35 L-NW HS/NA, heute CEM III/B 32,5 HS/NA
HOZ+	Bindemittel zusammengesetzt aus: 70 M.-% HOZ und 30 M.-% Kalksteinmehl
HPLC	Hochdruckflüssigkeitschromatographie
HüS	Hüttensand gemahlen
IC	Ionenchromatographie
IH	Injektionshilfe für Mikro
IRMA	IRMA steht für Immissions-Raten-Meß-Anlage
k'-Wert	Körnungsziffer
Kd L	flüssige Kunststoffdispersion: Copolymere Styrol/Acrylat-Dispersion
Kd P	Kunststoffredispersionspulver: Vinylacetat-Vinylester-Copolymerisat Pulver
Kd	Kunststoffdispersion
KStM	Kalksteinmehl
L	Luftgehalt
LF	Luftfeuchte
LIS	Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen
M.-%	Masseprozent
MC	Methylhydroxyethylcellulose, Viskosität 20000-25000 mPa
Mikro	hochfeiner Hochofenzement für Injektionsmörtel
\dot{m}_{knick}	Verdunstungsmassenstromdichte (Verfahren Klopfer)
\dot{m}	Verdunstungsmassenstromdichte (allgemein)
μ -Wert	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, auch WDDWZ
O _i	innere Oberfläche nach BET über Wasserdampf bestimmt
ω	Wasseraufnahmekoeffizient
p	Druck
p _s	Sattdampfdruck des Wassers
PUR	lösemittelfreies, in Wasser emulgierbares Polyisocyanat
PRV	Porenradienverteilung
PZ	Portlandzement PZ 45 F HS/NA, heute CEM I 42,5 R HS/NA

φ_L	relative Luftfeuchte
r	Porenradius
REM	Rasterelektronenmikroskopie
ρ	Dichte
ρ_f	Frishmörtelrohddichte
ρ_R	Festmörtelrohddichte, das Alter der Proben in Tagen ist angehängt
SKH	Sumpfkalk
sp. O.	spez. Oberfläche aus der Kornverteilung der Lasergranulometrie berechnet
SP10	Quarzmehl mit einem Siebdurchgang bei 63 μm von 99,5 M.-%
β_{BZ}	Biegezugfestigkeit der Mörtel, das Alter der Proben ist angehängt
β_D	Druckfestigkeit der Mörtel, das Alter der Proben ist angehängt
β_{HZ}	Haftzugfestigkeit, das Alter der Proben ist angehängt
β_Z	Zugfestigkeit, das Alter der Proben ist angehängt
ST	Stabilisierer ST1 für Zementsuspensionen
σ	Oberflächenspannung
σ_Z	Zugspannung
t_{knick}	Zeitpunkt des Übergangs von einem zum anderen Trocknungsabschnitt
TZ	Tonerdezement
TZ+	Bindemittel zusammengesetzt aus: 70 M.-% TZ und 30 M.-% KStM
TZ++	Bindemittel zusammengesetzt aus: 33,3 M.-% TZ, 33,3 M.-% HüS und 33,3 M.-% Kalksteinmehl
Θ	Randwinkel bei Hg-Druckporosimetrie, Glanzwinkel bei Röntgendiffraktometrie
ϑ	Temperatur
u_m	massebezogene Feuchte eines Stoffes
u_{m53}	massebezogene Ausgleichsfeuchte eines Stoffes bei einer rel. Luftfeuchte von 53 %
u_{m80}	massebezogene Ausgleichsfeuchte eines Stoffes bei einer rel. Luftfeuchte von 80 %
u_v	volumenbezogene Feuchte eines Stoffes
Vol.-%	Volumenprozent
ω	Wasseraufnahmekoeffizient
W/B	Wasser/Bindemittel-Wert
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert
w_0	flächenbezogener Wassergehalt
WA	Wasseranspruch
w_{ab}	absoluter Wasserabgabegrad

w_{ab24}	Wasserabgabegrad nach 24 h
w_{ak}	Wasserabgabekoeffizient
WaKH	Wasserkalkhydrat, CL70
WDDWZ	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, auch μ -Wert
WKH	Weißkalkhydrat CL90
w_{kn}	Verhältnis der im Trocknungsabschnitt abgegebenen flächenbezogenen Wassermenge zum flächenbezogenen Wassergehalt zu Beginn der Messung
w_{knick}	flächenbezogener Wassergehalt am Knickpunkt
w_m	absoluter Wasseraufnahmegrad nach DIN 52103
w_{m24}	Wasseraufnahmegrad nach 24 Stunden
w_{mA}	Wasseraufnahmegrad nach DIN 52103, Verfahren A
w_{mV}	Wasseraufnahmegrad im Vakuum bei 50 hPa, auch als w_m bezeichnet
WRV	Wasserrückhaltevermögen
XPL	gekreuzte Polarisatoren
XRD	Röntgendiffraktometrie

Zementchemische Abkürzungen

A	Al_2O_3
C	CaO
Cc	Calciumcarbonat
Cs	$CaSO_4$
F	Fe_2O_3
H	H_2O
S	SiO_2

1 Einleitung

Viele Kalkputze historischer Bauwerke sind trotz ihres Alters gut erhalten. Dabei ist ihr Erhaltungszustand oftmals abhängig von der Lage am Gebäude, d. h., ist der Putz dem Wetter ausgesetzt oder nicht. Auftretende Schäden sind an wettergeschützten Bereichen größer, da die Anlagerungen und sämtliche Reaktionsprodukte dort verbleiben und nicht vom Regenwasser abtransportiert werden.

An gut erhaltenen Putzen sind sowohl im unbewitterten Innenbereich als auch im bewitterten Außenbereich z. T. großflächige Ablösungen vom Putzuntergrund zu beobachten, eine Folge der Einwirkung hygrothermischer und chemischer Einflüsse während der Standzeit.

Putzschäden sind in den letzten Jahrzehnten, parallel zu den zunehmenden Schäden an Bauwerken aus Naturstein, merklich angestiegen. Daß für diese Schäden der hohe Schwefeldioxidgehalt in der Atmosphäre mit verantwortlich gemacht werden kann, wurde recht früh von EVELYN 1661, KEEPE 1683 und NOURSE 1700 erkannt.

Der SO_2 -Gehalt der Atmosphäre führt jedoch nicht nur zu Schäden an Natursteinen, sondern nach HOFFMANN 1977 und NIESEL 1979 auch zur Bildung von Gips in den oberflächennahen Zonen der Kalkputze, was nachfolgend u. a. zum Ablösen der Putze vom Putzuntergrund führen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit sollten Mörtel zur Erhaltung geschädigter Kalkputze an historischen Bauwerken entwickelt werden. Der Schwerpunkt lag dabei bei der Entwicklung von Mörteln für die folgende Anwendungsgebiete:

- Mörtel, die vor der Verfüllung hohl liegender Putzbereiche zu deren Randsicherung und zum Wiederbefestigen loser Putzschollen dienen sollen. Eine weitere Anforderung an diese Mörtel ist neben einer hohen Haftzugfestigkeit die Abnehmbarkeit, ohne die Altsubstanz hierbei zu schädigen. - **Haftmörtel**
- Mörtel zum Verfüllen partiell hohl liegender Putzpartien, die im Anschluß an die Maßnahme wieder einen ausreichenden und dauerhaften Verbund mit dem Untergrund aufweisen sollen. - **Hinterfüllmörtel**
- Kalkputze, die möglichst exakt historischen Putzen nachgestellt sind, mit folgenden Bindemitteln:
 - industriell trockengelöschtes Weißkalkhydrat - **Kalkmörtel**
 - nach alten Verfahren mit nassem Sand trocken gelöschter Branntstückkalk - **Sandkalkmörtel**

Sie sollen als Ersatzmörtel an solchen Stellen dienen, wo der Verlust der historischen Putze eingetreten ist.

Erläuternd zu den kurzen Charakterisierungen dieser Mörtel soll Bild 1 ihre Anwendung am Bauwerk schematisch verdeutlichen.

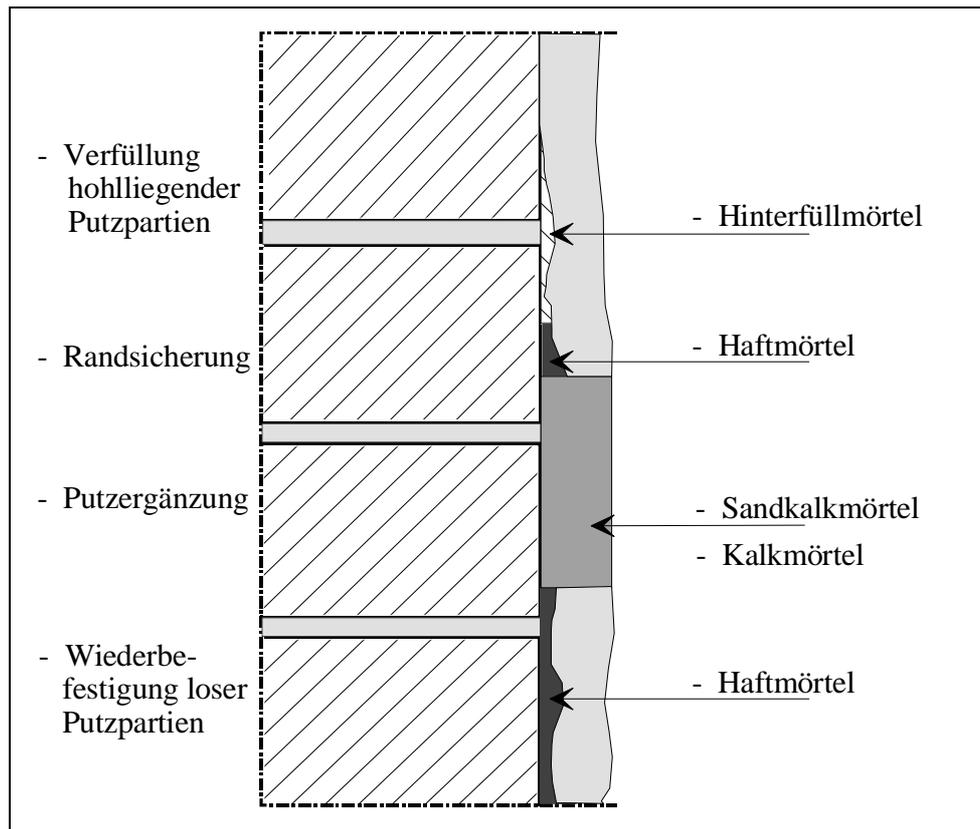


Bild 1: Schematisierte Darstellung der Lage der Haft-, Hinterfüllmörtel und Kalkputze

Der Erfolg der Entwicklung solcher Mörtel hängt u. a. davon ab, ob sie mit den vorhandenen historischen Putzen verträglich sind. Der Begriff Verträglichkeit wird hier nicht nur im Sinne der chemischen Verträglichkeit und angepaßter Festigkeitseigenschaften, sondern auch hinsichtlich der hygrischen Eigenschaften, d. h. der Wasseraufnahme, der Wasserabgabe, der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl und der hygrischen Dehnung verstanden.

Die Verträglichkeit muß insbesondere bei den Mörteln geprüft werden, die anders als die historischen Kalkputze auch hydraulische Bindemittel enthalten, da im Zusammenhang mit den umweltbedingt erhöhten Sulfatgehalten der historischen Mörtel bei Ersatzmörteln Treiberscheinungen durch z. B. Ettringit auftreten können. Aus diesem Grunde sind für die Erhaltung geeignete Bindemittel vorzusehen. Hinweise zur Prüfung der Verträglichkeit geben STÜRMEER 1993 und HENKEL 1994.

Bei Ersatzmörteln, die als Bindemittel Weißkalkhydrat enthalten, ist ebenfalls dafür Sorge zu tragen, daß deren Eigenschaften den historischen Putzen ähnlich sind. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß Kalkmörtel langsam carbonatisieren und ihre eigentlichen technologischen und hygrischen Kennwerte erst nach langer Zeit am Bauwerk erreichen. Dabei ist zu beachten, daß sich ihre Eigenschaften abhängig von

ihrer Lage am Bauwerk entwickeln, z. B. Wetterseite bzw. wettergeschützte Seite. So erreichen Putze, die häufigen Feucht-Trocken-Wechseln ausgesetzt sind, andere Eigenschaften als Mörtel, die vor Beregnung geschützt sind.

Teilergebnisse der Mörtelentwicklungen dieser Dissertation sind bereits veröffentlicht in: BÖTTGER 1992, BÖTTGER 1993a, BÖTTGER 1993b, BÖTTGER 1993c, BÖTTGER 1993d, PURSCHE 1993, BÖTTGER 1994.

2 Literaturübersicht

2.1 Ursachen für Schäden an Putzen historischer Bauwerke

2.1.1 Einflüsse bei der Herstellung von Putzen

Schon beim Aufbringen der Putze können Ursachen für spätere Schäden gelegt werden. Jedoch ist bei den historischen Gebäuden, deren Putze heute noch nach Jahrhunderten Standzeit erhalten sind, davon auszugehen, daß Fehler bei der Putzherstellung vermieden wurden. Gleichwohl soll vollständigkeithalber ein kurzer Hinweis auf mögliche, aber vermeidbare Fehler bei der Putzherstellung nicht fehlen.

Der Putzgrund bestimmt die Putzeigenschaften erheblich. So ist eine gute Putzhaftung nach KNÖFEL 1993b bedingt durch eine bestimmte Rauigkeit und Saugfähigkeit des Putzgrundes nötig, die ggf. durch Spritzbewurf sicherzustellen ist.

Direkt nach der Verarbeitung von Putzen erfolgt zunächst durch eine erwünschte Wasserabgabe an den Untergrund eine erste Verfestigung. Ein schlechtes Vornässen des Putzuntergrundes und/oder mangelnde Nachbehandlung können zum Verdursten der ggf. vorhandenen hydraulischen Bindemittelanteile führen. Dies verursacht eine Erhöhung der Porosität und Senkung der Festigkeiten. Bei einer zu schnellen Trocknung ist nach KÜNZEL 1994 mit dem Überschreiten der Zugfestigkeit der Putze und infolgedessen mit der Ausbildung von Rissen zu rechnen, siehe hierzu Bild 2.

Im Rahmen dieser Arbeit wird für das Schrumpfen, einer Volumenkontraktion infolge von Hydratationsvorgängen (auch als chemisches Schwinden bezeichnet) und Abgabe von überschüssigem Zugabewasser, der Begriff 1. Schwinden (ϵ_{s1}) gewählt.

Zusätzlich findet der Begriff „**Schwinden in der Form**“ (ϵ_{sF}) Verwendung, der die Volumenkontraktion bis zu Beginn der üblichen Bestimmung des 1. Schwindens (Zeitpunkt der Entnahme der Prismen aus der Form) bezeichnet. Sie kann je nach Bindemittel entweder durch chemische Reaktionen (hydraulische Bindemittel) oder durch Abgabe von Zugabewasser (Bindemittel, die keine hydraulischen Anteile enthalten) geprägt sein, also durch identische Vorgänge wie beim 1. Schwinden und ist Teil dessen. Sie ist, siehe Tabelle 1, die bei Kalkmörteln absolut dominierende Deh-

nung. Die Erfassung dieser beiden Volumenkontraktionen findet üblicherweise in Form einer Längenänderung statt.

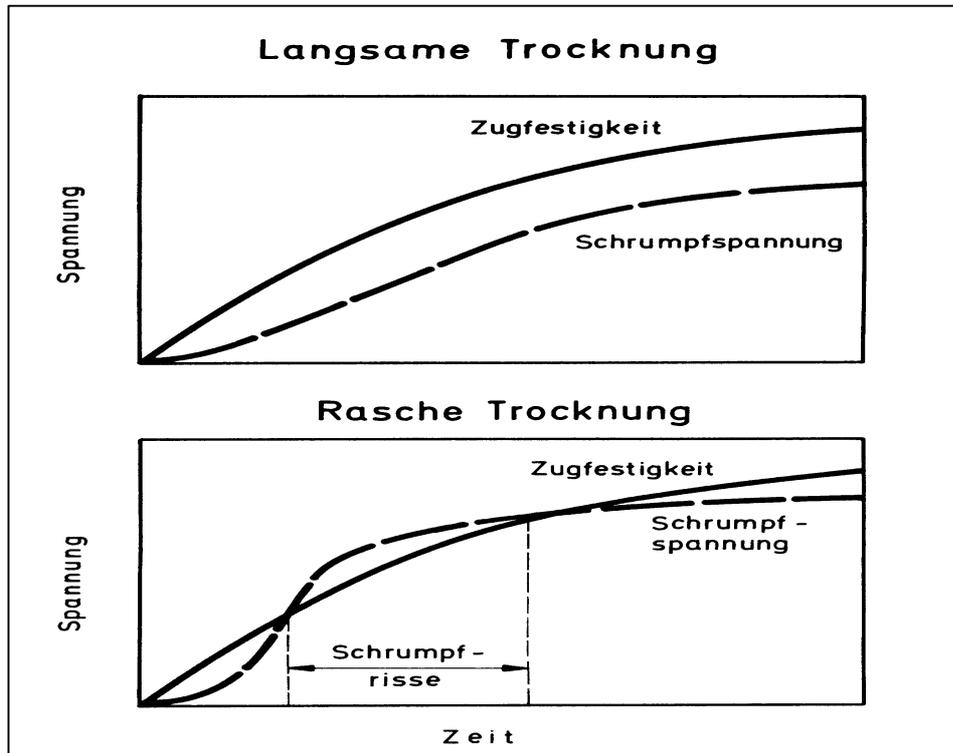


Bild 2: Schematischer Verlauf der Entwicklung der Festigkeit und der Schrumpfspannung frisch aufgetragener Putze nach KÜNZEL 1994¹. Dabei steigt bei *langsamerer Trocknung* die Zugfestigkeit schneller als die Schrumpfspannung², während bei *rascher Trocknung* die Schrumpfspannung schneller als die Zugfestigkeit steigt, was zur Bildung von Schrumpfrissen führt.

Das Schwinden in der Form (ϵ_{sF}) und das 1. Schwinden (ϵ_{s1}) sind in erster Linie vom verwendeten Bindemittel abhängig. Einfluß haben auch die Art und Menge des verwendeten Zuschlages, die Zugabewassermenge und Zusätze. Tabelle 1 gibt für verschiedene Bindemittel das zu erwartende Schwinden an (GRUBE 1991, TRAUTMANN 1992, HOFFMANN 1992, BÖTTGER 1994, HUESMANN 1994, BOENKENDORF 1995 und GIPS 1995 und WINNEFELD 1996).

Risse haben einen negativen Einfluß auf die Dauerhaftigkeit der Putze, da sie die Aufgabe des Außenputzes unterlaufen, das Gebäude vor dem Zutritt von Wasser zu schützen. Eindringendes Wasser führt zu Schäden bei Frost-Tauwechsel-Belastungen des Putzes und zu erhöhter hygrischer Dehnung und steigendem Dampfdruck.

¹ KÜNZEL 1994: Abb. 1, S. 16

² KÜNZEL 1994 verwendet Schrumpfen im Sinne des Begriffes 1. Schwinden, das chemisches Schwinden und Trocknungsschwinden (Abgabe überschüssigen Zugabewassers) zusammenfaßt.

Starkes Reiben oder Glätten des Putzes mit Stahlkelle oder Holzbrett führt, wie z. B. von BERTRAM 1956 und KÜNZEL 1994 beschrieben, zu einer Anreicherung des Bindemittels an der Putzoberfläche, was dort ein dichteres Gefüge zur Folge hat. Dies bedingt langsamere Carbonatisierung und reduzierte Wasserdampfdurchlässigkeit und kann Ursache für spätere Schäden sein.

Tabelle 1: Abhängigkeit des „Schwindens in der Form“ und des 1. Schwindens von Mörteln vom verwendeten Bindemittel

Bindemittel	Schwinden in der Form ϵ_{sF} / mm/m	1. Schwinden ϵ_{s1} ³ / mm/m
Sumpfkalk (SKH, CL90, CL80)	15-25,0	0,3-2,5
Weißkalkhydrat (WKH, CL90, CL80)	1,5-30,0	0,1-2,2
Wasserkalkhydrat (WaKH, CL70)	0,4-4,0	0,4-1,5
hydraulischer Kalk (HK, HL 2)	0,3-1,6	0,9-3,5
Portlandzement (PZ, CEM I)	< 0,1	0,7-2,2
Hochofenzement (HOZ, CEM III)	< 0,1	0,5-2,5
Sulfathüttenzement (HGZ)	< 0,1	0,3-1,5
Gips	<0,1	0,3 ⁴

2.1.2 Umweltbedingte Ursachen für Putzschäden

Die Zerstörung von Bausubstanz durch physikalische, chemische und biologische Umwelteinflüsse, wird seit langem beobachtet. Im Alten Testament sind in MOSES 3 die Verhaltensweisen von Bauherren bei auftretenden Bauschäden behandelt. Hier findet sich eine phänomenologische Beschreibung von Bauschäden, ohne auf die Schadensursachen einzugehen; der Schwerpunkt liegt in der Entsorgung des „unreinen“ Baumaterials.

VITRUV⁵ beobachtet, daß die Emission von Ruß und anderen Schadstoffen zu deren Immission führt und nachfolgend Schäden an der Bausubstanz entstehen können.

Die physikalischen und chemischen Belastungen dominieren bei der Entstehung von Schäden. Erst bei älteren, häufig durchfeuchteten Putzen spielt auch der biologische Angriff durch Bakterien, Pilze, Algen usw. eine Rolle. Der Befall durch Mikroorganismen ist nach WARSCHEID 1995, wegen der Porenstruktur der Putze, auf die Oberfläche bzw. hohlliegende Partien beschränkt.

³ Nach Standardmeßverfahren bestimmt

⁴ Dieser Wert bezieht sich auf Gipsputze aus β -Halbhydrat oder Anhydrit III-s, bei Verwendung von Estrichgips aus α -Halbhydrat oder Anhydrit-E kann ein geringeres Schwinden oder sogar leichtes Quellen auftreten.

⁵ FENSTERBUSCH 1991: Vitruv, Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt von C. Fensterbusch, S. 323

2.1.2.1 Belastungen von Putzen durch physikalische Einflüsse

Die physikalischen Belastungen von Putzmörteln äußern sich in hygri-schen und thermisch bedingten Längenänderungen und durch Frost-Tau-Wechsel. Die thermische Dehnung wurde in der Vergangenheit als Schadensursache von vielen Autoren wie z. B. KÜNZEL 1989, GERTIS 1984 und NIESEL 1979 überschätzt. Nach KÜNZEL 1994 liegt in der Praxis jedoch eine gekoppelte, gegenläufige Einwirkung von Temperatur und Feuchte vor, weshalb in der Regel von einer hygrothermischen Beanspruchung auszugehen ist. KÜNZEL 1994 veranschaulicht die Wirkung hygrothermischer Dehnungen in Bild 3.

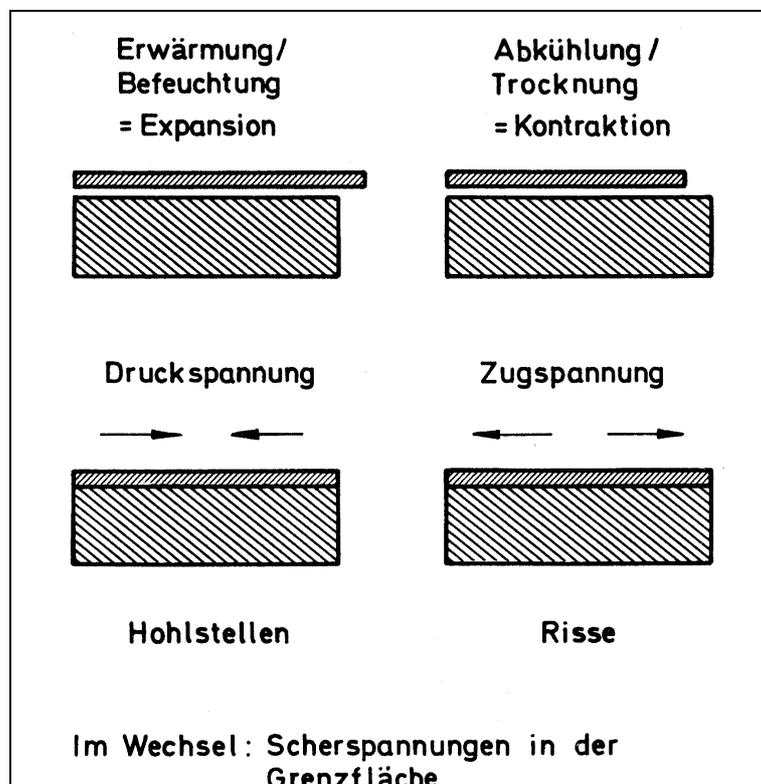


Bild 3: „Darstellung über den Zusammenhang „hygrothermische Beanspruchung - Spannung“ bei Außenputzen.“⁶ KÜNZEL 1994

Die auftretenden Dehnungen führen sehr leicht zu Rissen bzw. zu Ablösungen des Putzes vom Untergrund. Schon kleine Dehnungen können relativ großflächige Ablösungen des Putzes vom Untergrund, als hohlliegende Bereiche, Blasen oder Ausbeulungen bezeichnet, verursachen. Nach KÜNZEL 1994, siehe Bild 4, kann eine hygro-

⁶ KÜNZEL 1994: Abb. 2, S. 17

thermische Dehnung von 0,5 mm/m eine 4 mm hohe Ausbeulung eines kreisrunden hohlliegenden Putzbereiches von 30 cm Durchmesser verursachen.

In der Regel sind die größten Längenänderungen beim Erhärten von Kalkputzen durch Wasserabgabe (Schwinden in der Form) zu erwarten. BÖTTGER 1994 und HOFFMANN 1992 geben hierfür Werte von 10-45 mm/m an. Die hierdurch implizierten Zugspannungen können, wie Bild 2 zeigt, zur Rißbildung führen. Eine Schädigung von Kalkputzen findet in der Regel ihre Anfänge in den starken Längenänderungen beim Erhärten. Die auftretenden Zugspannungen führen - dies läßt sich bei vielen historischen Putzen nachweisen - zu einem netzartigen Rißsystem. Diese Risse verheilen aufgrund von Umkristallisationen, anfänglich von Calciumhydroxid - später auch von Calciumcarbonat, meist recht schnell. Sie stellen aber letztlich doch Schwachstellen dar, die Ausgangspunkte für spätere Putzschäden sein können.

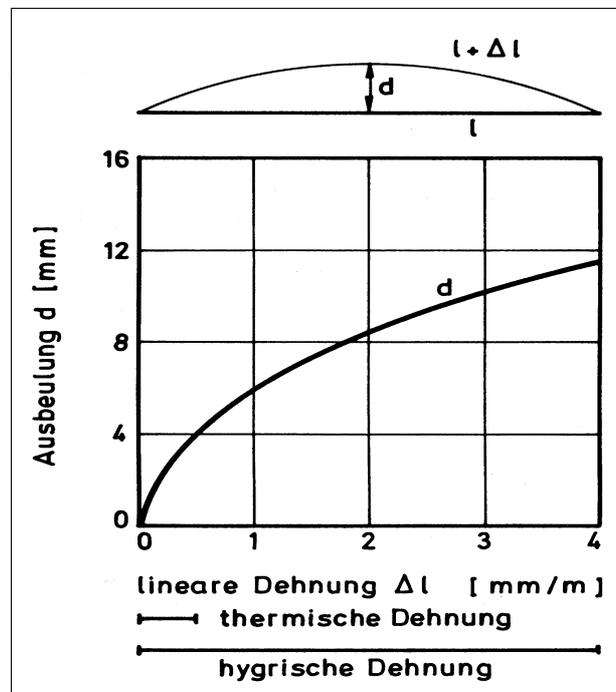


Bild 4: „Zusammenhang zwischen Ausbeulung und linearer Dehnung einer abgelösten kreisrunden Schicht von 30 cm Durchmesser (Blase)“⁷. KÜNZEL 1994.

Putze sind rißempfindlich bei größeren Zugspannungen, da die Zugfestigkeit β_z in der Regel nur 10 % der Druckfestigkeit β_D beträgt. SCHUBERT 1993⁸ führt zur Abschätzung der Rißempfindlichkeit den Kennwert K_R ein, der in vereinfachter Form für mineralische Putze entsprechend Gleichung (1) angewendet werden kann.

⁷ KÜNZEL 1994: Abb. 3, S. 18. Die Einheit der Ordinate wurde korrigiert, sie lautet im Original [m/m]

⁸ in KNÖFEL 1993, S. 109 - 111

$$K_R = \frac{\beta_Z}{E_Z \cdot \epsilon_s} \quad (1)^9$$

K_R = Kennwert für Rißempfindlichkeit
 β_Z = Haftzugfestigkeit in N/mm²
 E_Z = Zug-Elastizitätsmodul in N/mm²
 ϵ_s = Schwinden in mm/m

Günstig hinsichtlich geringer Rißneigung ist ein möglichst hoher K_R -Wert. Die Anwendung der Putzregel DIN 18550¹⁰ hat sich bei konventionellen Putzsystemen (z. B. historischen) bezüglich der Rißfreiheit bewährt. Sie verlangt, daß die Festigkeiten und die E-Moduln eines Putzsystems von innen nach außen abnehmen.

2.1.2.2 Belastung von Putzen durch chemische Einflüsse

Die chemische Belastung der Putze ist geprägt durch eine Vielzahl von Einflüssen aus der Umwelt, die zur Bildung oder Mobilisierung von Salzen führen. Im wesentlichen kommen für deren Entstehung die folgenden Ursachen in Betracht:

- Immissionen von Luftschadstoffen (Schwefeldioxid, Sulfat, Stickoxide, Nitrate, Chlorid, Fluorid und Ammoniak)
- Eintrag von salzbildenden Anionen und Kationen durch Regenwasser, Oberflächenwasser und Grundwasser (aufsteigende Feuchte)
- Lösen von Salzen aus der Bausubstanz

Diese Salze konzentrieren sich auf die oberflächennahen Bereiche oder reichern sich mit zusätzlich eingetragenen oder gelösten Salzen in Trocknungshorizonten an. Durch die mit der Salzbildung in der Regel verbundene sowie infolge der bei Umkristallisation und Hydratation der Salze eintretende Volumenzunahme, sind Schäden der Bausubstanz zu beobachten.

Häufig bei Schäden an historischen Bauwerken auftretende Salze sind in Tabelle 2 aufgeführt (KNÖFEL 1980¹¹ und ZEHNDER 1982¹²), ergänzt um deren Dichten, Molvolumina, Löslichkeiten und Sättigungsfeuchten (ALEXEJEV 1976, RÖSSLER 1979, VOGT 1994, MERCK 1996).

Die Auswirkung von Umwelteinflüssen auf die Bausubstanz wurde im wesentlichen an historischen Bauwerken ausführlich beschrieben und wissenschaftlich untersucht. Dabei wird in den letzten Jahrhunderten eine rapide Zunahme der Verwitterungsgeschwindigkeit beobachtet. Als Ursachen wird hierfür schon früh die Umstellung von bis dahin verwendeten Brennstoffen wie Holz und Holzkohle auf Schwefelverbindungen enthaltende fossile Brennstoffe angenommen. Zudem setzte die zunehmende In-

⁹ KNÖFEL 1993: S. 110

¹⁰ DIN 18550 Teil 1, Abschnitt 5.1

¹¹ KNÖFEL 1980: S.53

¹² ZEHNDER, 1982: S. 86

dustrialisierung Schwefeldioxid z. B. durch Verhüttung von Erzen frei. EVELYN 1661 erkannte recht früh, daß der in den Abgasen enthaltene „Schwefel“¹³ Ursache für Bauschäden ist. Als konkretes Beispiel für solche Schäden nennt KEEPE 1683 die Kathedrale von Westminster. NOURSE 1700 erwähnt wenig später weitere Bauwerke (das Sommerset-House, das Savoy und das Northumberland-House), an denen Schäden durch die aggressive Wirkung von Rauchgasen auftraten.

Tabelle 2: Die häufigsten bei Schäden an historischer Bausubstanz auftretenden Salze und deren Eigenschaften

	Salz	Dichte / g/cm ³	Mol- volumen / cm ³ /mol	Löslichkeit bei 20 °C / g/l	Sättigungsfeuchte rel. Feuchte	
					%	°C
1	CaCl ₂	1,75	130,6	739	32,0	20,0
2	CaCl ₂ ·6H ₂ O	1,68	130,4	5360	32,0	20,0
3	CaCO ₃	2,71	36,9	0,0143	-	-
4	Ca(NO ₃) ₂	2,36	69,5	1270	55,0	20,0
5	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1,82	129,8	2660	55,0	20,0
6	CaSO ₄	2,97	45,8	1,9	-	-
7	CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	2,62	55,4	8,8	-	-
8	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2,31	74,5	2,05	-	-
9	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ ·H ₂ O	2,60	126,2	2,5	-	-
10	KCl	1,99	37,5	344	86,0	20,0
11	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	2,03	198,6	192,6	-	-
12	K ₃ Na(SO ₄) ₂	2,66	125,2	-	-	-
13	KNO ₃	2,00	50,6	315	86,0	20,0
14	K ₂ SO ₄	2,67	65,3	111	97,5	20,0
15	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	1,64	156,4	420	54,0	20,0
16	MgSO ₄	2,66	42,3	596	90,1	20,0
17	MgSO ₄ ·H ₂ O	2,57	53,9	684	90,1	20,0
18	MgSO ₄ ·6H ₂ O	1,75	130,6	335	90,1	20,0
19	MgSO ₄ ·7H ₂ O	1,68	146,7	710	90,1	20,0
20	Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O	2,26	55,0	210	92	20,0
21	NaCl	2,09	28,0	360,5	75,0	20,0
22	Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O	1,51	154,0	210	92	20,0
23	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	1,45	197,4	210	92	20,0
24	NaHCO ₃	2,21	38,0	100	-	-
25	Na ₃ H(CO ₃) ₂ ·2H ₂ O	2,14	105,6	130	-	-
26	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O	2,25	148,7	-	77,0	-
27	Na NO ₃	2,26	37,8	866	75,4	20,0
28	Na ₂ SO ₄	2,67	53,3	162	81,7	25,0
29	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	1,46	220,1	162	81,7	25,0
30	NH ₄ NO ₃	1,72	46,5	1896	63	20,0

In England stellte zudem in den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts eine Expertenkommission (EXPERT 1860) fest, daß auffällige Schäden an dem damals erst

¹³ aus NIESEL 1979: S. 75. „This is that pernicious Smoake which sullyes all her Glory, superinducting a sooty Crust or Furr upon all that is lights, spoyling the moveables, tarnishing the Plate, Glidings and Furniture, and corroding the very Iron-bars and hardest Stones with those piercing and acrimonious Spirits which accompany its Sulphure ; and executing mire in one year, than exposed to the pure Aer of the Country it could effect in some hundrets.“

fünfzehn Jahre alten Parlamentsgebäude in London auf Schwefelsäure - aus Rauchgasen entstanden - zurückzuführen waren.

Der bis in die 80er Jahre dieses Jahrhunderts stetig zunehmende SO_2 -Gehalt der Luft führte nach WINKLER 1973 zu einer erheblichen Zunahme der Schäden an den untersuchten historischen Bauwerken. Hierüber berichtet auch WOLFF 1972, der feststellt, daß die Schädigung des Schlaitdorfer Sandsteines am Kölner Dom nach jahrzehntelanger Vorschädigung heute etwa achtmal so schnell verläuft wie vor rund 90 Jahren. Die Entstehung von Schäden an Bauwerken durch Luftschadstoffe stellt einen wichtigen Aspekt dar. Im folgenden wird der Ablauf der Schadensbildung durch Angriff von schwefeldioxid- und stickoxidhaltiger Atmosphäre dargestellt.

Schäden durch SO_2 -Angriff wurden überwiegend bei historischen Bauwerken aus Naturstein bzw. an Putzen historischer Bauwerke beobachtet und beschrieben. Hierbei zeigt sich in der Regel, daß die Zerfallserscheinungen am stärksten in industriellen und städtischen Ballungsgebieten und am geringsten in ländlicher und dünn besiedelter Umgebung sind. KAISER 1907 weist darauf hin, daß Schlaitdorfer Sandstein am Kölner Dom schwerste Schäden erkennen läßt, während er am Ulmer Münster nur mäßig und am Schloß Neuschwanstein überhaupt nicht angegriffen wurde.

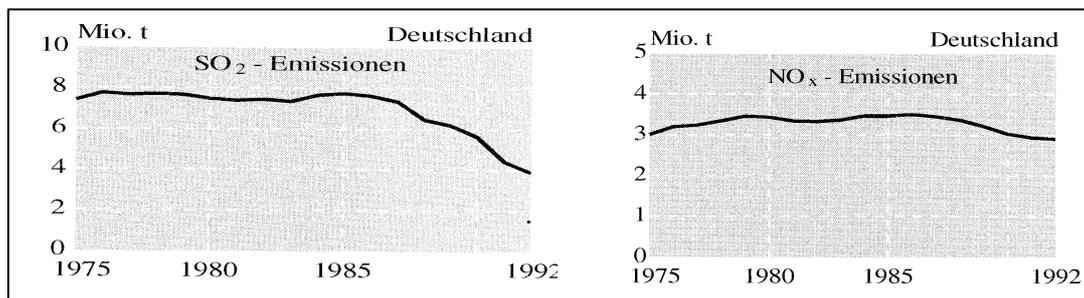


Bild 5: SO_2 - und NO_x -Emissionen in Deutschland, aus UBA 1995¹⁴

Die SO_2 -Konzentration der Atmosphäre in den Industriestaaten ist nach LIS 1981a, LIS 1981b, LIS 1983, SO_2 NRW und UBA 1995 seit etwa 1975 rückläufig. Bedingt durch die Entschwefelung der Rauchgase von Kraftwerken seit 1985 verläuft diese Tendenz, siehe Bild 5, seither beschleunigt. Dennoch wurden nach UBA 1995 im Jahre 1992 ca. 3,9¹⁴ Millionen Tonnen SO_2 in Deutschland emittiert.

Die Gehalte an Stickoxiden (NO - bzw. NO_2) in der Atmosphäre, siehe Bild 5, sind in den letzten Jahrzehnten gestiegen. Eine Umkehr dieser Tendenz zeichnet sich seit etwa 1986 ab. Die Emission von Stickoxiden (als NO) erreichte im Jahre 1992 in Deutschland nach UBA 1995 einen Wert von 2,9 Millionen Tonnen¹⁴ pro Jahr.

¹⁴ UBA 1995: S. 17 und 18

Die sich infolge der Emission von Schadstoffen ergebenden Immissionsraten werden mittels verschiedener Verfahren bestimmt. Dabei lagen die von LUCKAT 1981 nach dem IRMA-Verfahren¹⁵ bestimmten Werte für SO₂ und NO_x (als NO₂ angegeben) in den Jahren 1978 - 1979 als Mittelwert¹⁶ aus 20 Meßstellen in der BRD bei 90 mg SO₂·m⁻²·d⁻¹ und 1,4-2,7 mg NO₂·m⁻²·d⁻¹¹⁷. Messungen von RADERMACHER 1990 (Verfahren LIS) ergaben als Mittelwert von 20 Meßstellen in Nordrhein-Westfalen 15,2 mg·m⁻²·d⁻¹ Sulfat und 9,6 mg·m⁻²·d⁻¹ Nitrat. Dabei lag der Anteil der trockenen Deposition bei Sulfat und Nitrat zwischen 15-35 %. Neben den erwähnten Immissionsraten für Sulfat und Nitrat bestimmte RADERMACHER 1990 Stoffeinträge für Cl⁻, F⁻, NH₄⁺, H⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, siehe Tabelle A2 im Anhang.

In der Atmosphäre befindliches SO₂ wird nach BEILKE 1975 in Gegenwart von Luftfeuchte zu großen Teilen in Sulfate umgesetzt. SCHÄRER 1980 stellt fest, daß etwa 20-50 % des in der Luft befindlichen Schwefeldioxids zu Sulfaten oxidiert wird. Hierbei spielen fotochemische Oxidationsprozesse die wichtigste Rolle.

PERSEKE 1982 kommt zu dem Ergebnis, daß die trockene Deposition von SO₂ in unserem Klima die nasse Deposition, von in der Atmosphäre gebildetem SO₄²⁻, dominiert. Die Autorin stellt die Reaktionsmechanismen der trockenen Deposition von SO₂ und von SO₄²⁻-Aerosol in Bild 6 schematisch dar. Ihrer Ansicht nach überwiegt bei den in der Atmosphäre gebildeten Sulfaten jedoch die nasse Sulfatdeposition gegenüber der trockenen Sulfat-Aerosol-Deposition.

Das auf den Baustoffoberflächen deponierte bzw. in die Poren des Baustoffes eindiffundierte Schwefeldioxid reagiert nach OPPERMAN 1973, HOFFMANN 1977, NIESEL 1979, GAURI 1982, DROCHYTKA 1988, JOHANSSON 1988, MEHLMANN 1988 und ZAPPIA 1992 zunächst unter Bildung von Sulfiten, die in Gegenwart ausreichend hoher Wassergehalte schnell zu Sulfaten oxidieren, während sich in Gegenwart von Katalysatoren und Oxidantien nach VALES 1986, CHENG 1987 und MANGIO 1989 sofort Sulfate bilden.

¹⁵ IRMA steht für **Immissions-Raten-Meß-Anlage**

¹⁶ LUCKAT 1981: S. 34 - 74 und S. 90

¹⁷ Die von LUCKAT 1981 angegebenen Werte beziehen sich auf SO₂ und NO₂, die gemessenen Immissionsraten waren 60 mg SO₂·m⁻²·d⁻¹ und 1 - 2 mg NO₂·m⁻²·d⁻¹. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen von RADERMACHER 1990 sind die Werte im Text auf Immissionsraten von Sulfat und Nitrat umgerechnet. Die Immissionsraten für NO₂ sind von LUCKAT 1981 erstmals bestimmt worden, dabei lagen 55 % der gemessenen Werte unterhalb der Nachweisgrenze, deshalb sind für NO₂ keine zusammenfassenden Werte, sondern nur Einzelergebnisse angegeben. Die im Text angegebenen Werte geben die Schwankungsbreite der verbliebenen Meßwerte wieder.

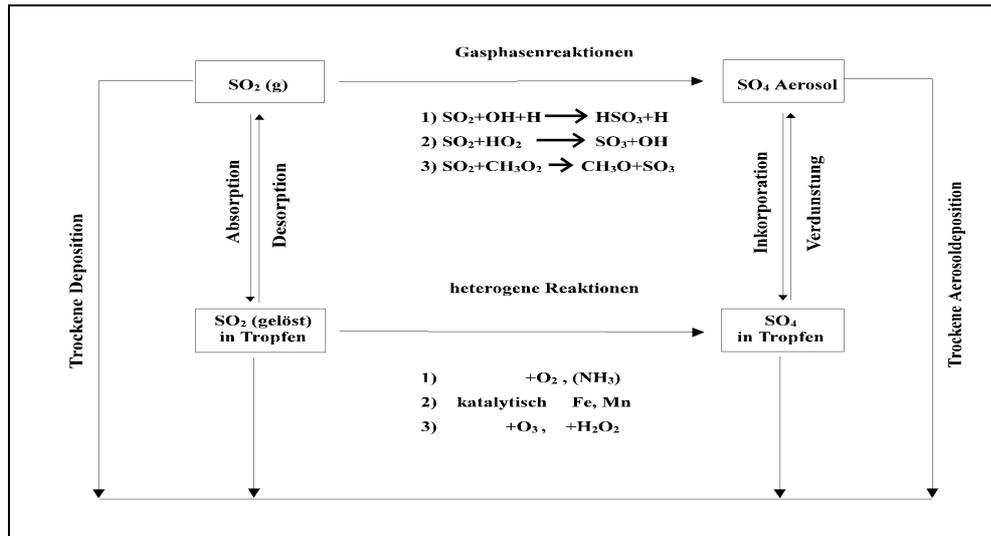


Bild 6: Darstellung der Prozesse bei trockener Deposition von SO₂ und SO₄²⁻ aus der Atmosphäre nach PERSEKE 1982¹⁸

Als Katalysatoren bei der Oxidation von SO₂ kommt auch kohlenstoffhaltigen Rußteilchen, auf deren Oberfläche Schwermetalle wie Vanadium, Mangan, Eisen, Kupfer, Zink und Blei abgelagert sind, Bedeutung zu. Die Partikel nehmen zudem beim Aufbau von Krusten auf Bauwerken teil; ihre Wirkung wird von CAMUFFO 1982 und DEL MONTE 1984 beschrieben. Hervorzuheben ist insbesondere ihre katalytische Wirkung auf der Baustoffoberfläche. In Gegenwart solcher Rußteilchen wird Schwefeldioxid schnell oxidiert, reagiert dann sofort mit dem CaCO₃ der Staubablagerungen und den Bindemitteln der Putze zu Gips und trägt damit zur Krustenbildung auf den Oberflächen der Gebäude bei. Mittels mikroskopischer Untersuchungen können in die Kruste eingebettete Partikel nachgewiesen werden.

Neben Schwefeldioxid spielen auch andere Atmosphärien beim Angriff der Baustoffe eine Rolle. Heute sind die SO₂- und NO_x-Emissionen etwa gleich groß, siehe Bild 5, jedoch sind nur wenige Untersuchungen bekannt, die den Einfluß von NO_x auf die Baustoffe behandeln. Aus den Untersuchungen von NÜRNBERGER 1973, JUDEIKIS 1978, SCHURATH 1980, GAURI 1983, SCHOLL 1991, HANEEF 1993 und BALÁZS 1994 ist zu schließen, daß das NO_x zu N₂O₅ oxidiert und in Gegenwart von Feuchte oder Wasser zu Salpetersäure reagiert, siehe Bild 7.

Diese bildet mit den Alkali- und Erdalkaliverbindungen der Baustoffe Nitrate, die eine hohe Löslichkeit in Wasser aufweisen und deshalb leicht zu Trocknungshorizonten wandern können. Aus den Untersuchungen von SCHOLL 1991 ist zu entnehmen, daß es bei berechneten Proben zu Auswaschungen der gebildeten Nitrate mit nachfolgendem Abmehlen der Oberflächen der bewitterten Mörtel kam. An nicht berechneten

¹⁸ PERSEKE 1982: Abb. 2, S. 17

Mörtelprismen war die Bildung von Abplatzungen und Rissen wie bei treibendem Angriff zu beobachten.

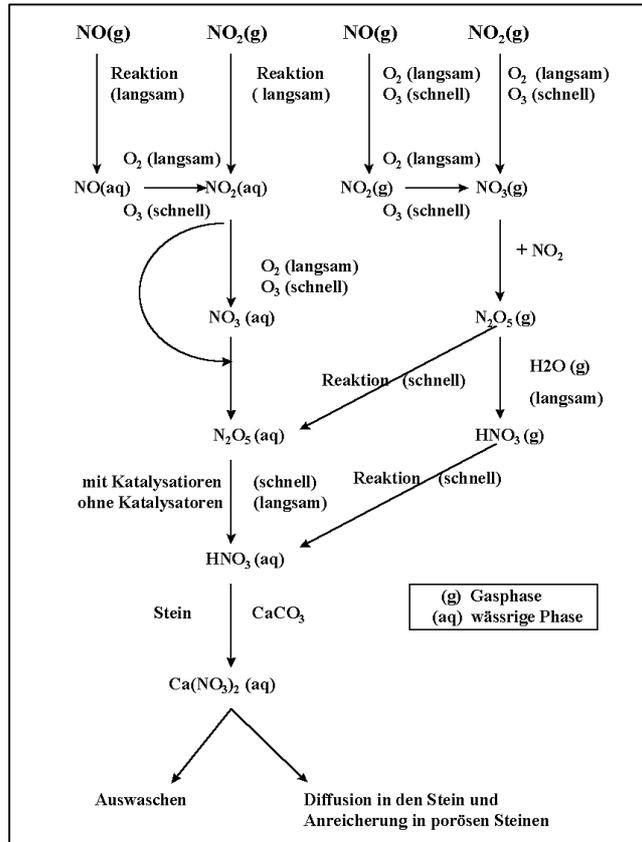


Bild 7: Schematische Darstellung der Umwandlung von NO_x zu Salpetersäure und deren Reaktion mit Calciumcarbonat aus Baustoffen nach HANEEF 1993¹⁹

Hohe Konzentrationen von Nitrat- und Ammoniumverbindungen in Baustoffen sind Sonderfälle, die zum einen nach SCHOLL 1991 und BALÁZS 1994 auf die geographische Nähe zu Emittenten beschränkt sind, zum anderen unter entsprechenden Bedingungen durch mikrobiellen Befall der Bauwerke, z. B. durch chemoorganotrophe oder nitrifizierende Bakterien, verursacht werden können. Nitrat- und Ammoniumverbindungen sind aufgrund ihrer großen Löslichkeit in Wasser nicht auf die Oberfläche beschränkt; BALÁZS 1994 kann ein tiefgründiges Eindringen bei Bildung von Nitrocalcit ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) nachweisen.

Kalk- oder dolomitgebundene Sandsteine, Putze und Mörtel werden vom Schwefeldioxid und seinen Folgeprodukten stark angegriffen. Ihr in der Regel feindispers vorliegendes Bindemittel bildet nach NIESEL 1979 besonders schnell Gips und andere Sulfate. Diese Gipsgenese bedingt, wie oben schon erwähnt, die Formation sogenannter Reaktionskrusten.

¹⁹ HANEEF 1993: Figure 4, S. 6, ins Deutsche übertragen

Gleichzeitig entstehen Krusten durch Anlagerung von Staub aus der Atmosphäre. Beide Krustenbildungen sind begleitet von Gefügeverdichtungen und überlagern sich häufig. In regengeschützten Bereichen ist die Krustenbildung begünstigt, vielfach sind hier größere Schichtdicken zu beobachten.

Krusten behindern häufig die Wasserabgabe. Der daraus resultierende, längere Verbleib der Feuchte im Bauwerk kann die Wanderung gelöster Bestandteile an die Oberfläche begünstigen.

Bei voll der Witterung ausgesetzten Bereichen des Bauwerks kann es zum Auswaschen des gebildeten Gipses kommen und als Folge zum Absanden des Zuschlages (NIESEL 1979, CAMUFFO 1982, NIEMEYER 1986, KNÖFEL 1994 und GORETZKI 1994), da Gips gegenüber Calcit eine ca. 125fach höhere Löslichkeit besitzt. Zum Absanden kommt es insbesondere dann, wenn der Bindemittelgehalt der Kalkputze niedrig ist.

Der Krustenbildung folgt häufig die Ausbildung oberflächenparalleler Risse. NIESEL 1979 macht neben hygri-schem Quellen, Schwinden und Frost-Tauwechseln auch die unterschiedliche thermische Dehnung der einzelnen Gefügebestandteile und der Gipskruste verantwortlich. Nach SCHAFFER 1933 und GOMES 1961 weist Gips eine etwa 5fach höhere thermische Dehnung als Calcit auf. Diese an Calcitkristallen bestimmten Werte stellen sich bei Mörteln anders dar. Messungen an Kalkmörteln von BÖTTGER 1994 und Daten aus dem Gips-Datenbuch GIPS 1995 ergeben eine nur 2fach höhere thermische Dehnung von Gipsmörteln gegenüber Kalkmörteln. Die dominierende Stellung der thermischen Dehnung bei der Entstehung oberflächenparalleler Risse stellen auch andere Autoren, wie KÜNZEL 1994, in Frage. Gleichwohl spielt sie im gesamten Schädigungsprozeß eine Rolle.

KNÖFEL 1980 macht für die Entstehung der Schäden die Volumenvergrößerung im Verhältnis 1 : 2 bei der Bildung von Gips aus den beteiligten Feststoffen verantwortlich. LAURIE 1925 hält das durch Auflösen und Wiederausscheiden verursachte ständige Wachstum der Kristallaggregate für maßgebend.

Die Bedeutung der Gipsbildung und der durch sie verursachten Volumenvergrößerung, begleitet von Kristallisationsdrücken, die Tabelle 3 zu entnehmen sind, wird anhand der Untersuchung zweier Autoren bekräftigt:

Bei Untersuchungen von KNÖFEL 1994 bilden sich Gipskrusten bei Kalkmörteln, die erhöhten SO₂-Konzentrationen und rel. Luftfeuchten zwischen 60-80% ausgesetzt sind. Gleichzeitig konnte die Ausbildung oberflächenparalleler Risse beobachtet werden. In diesem Falle genügte allein die trockene Immission von Schwefeldioxid, bei ausreichender Luftfeuchte, zur Ausbildung von Schäden, wie sie bei älteren Bauwer-

ken anzutreffen sind. Es ist zu betonen, daß allein die Volumenvergrößerung durch die Gipsbildung in diesem Fall das Schadensbild herbeiführte.

Tabelle 3: „Kristallisationsdrücke wichtiger bauschädlicher Salze.“²⁰, WINKLER 1973 und KNÖFEL 1980

Chemische Bezeichnung des Salzes	Mol-volumen / cm ³ /mol	Kristallisationsdruck in N/mm ²			
		C/CS ²¹ = 2 bei		C/CS = 10 bei	
		0 °C	50 °C	0 °C	50 °C
CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	55	33,5	39,8	112,0	132,5
CaSO ₄ ·2H ₂ O	75	28,2	33,4	93,8	111,0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	147	10,5	12,5	35,0	41,5
MgSO ₄ ·6H ₂ O	131	11,8	14,1	39,5	49,5
MgSO ₄ ·H ₂ O	54	27,2	32,4	91,0	107,9
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	220	7,2	8,3	23,4	27,7
Na ₂ SO ₄	53	29,2	34,5	97,0	115,0
NaCl	28	55,4	65,4	184,5	219,0
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	197	7,8	9,2	25,9	30,8
Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O	154	10,0	11,9	33,4	36,5
Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O	55	28,0	33,3	93,5	110,9

MANN 1992 weist auf Schäden an einer mit Kalkmörteln gemauerten Auskleidung eines Eisenbahntunnels hin. Die durch SO₂-Emmission bedingte Gipsbildung in den Kalkmörteln führte zu einer Volumenzunahme, die so große Zugspannungen in der Mauerwerksschale erzeugte, daß es zu oberflächenparallelen Abplatzungen der Ziegelsteine des Mauerwerks bis zu einer Tiefe von 7 cm kam.

Parallel zur Gipsbildung verläuft die Sulfatisierung und Nitrifizierung der Alkali- und Erdalkaliverbindungen. Deren Reaktionsprodukte sind meist sehr gut wasserlöslich und können durch Feuchteintrag weit transportiert werden. Unter geeigneten Bedingungen, d. h. dem Einfluß von Feuchte und Temperatur, können Alkali- und Erdalkalisalze hydratisieren bzw. dehydratisieren und Schäden durch Volumenänderung verursachen. Tabelle 4 enthält die Hydratationsdrücke einiger häufig auftretender Salze bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten (KNÖFEL 1980).

Bei größerem Feuchteintrag, z. B. durch Schlagregen oder aufsteigende Feuchte, können sich gut wasserlösliche Salze an Trocknungshorizonten anreichern und infolge des Kristallisationsdruckes, siehe Tabelle 3, zur Zerstörung des Putzes oder zum Wegdrücken des Putzes von der Wand führen.

Nach WENDLER 1993 kann es bei Feuchtwechseln in Gegenwart von Salzen, insbesondere aber bei Gips und Calciumnitraten, zu einer irreversiblen Erhöhung der hygrischen Dehnungen kommen.

²⁰ KNÖFEL 1980: Tabelle 5, S. 54

²¹ KNÖFEL 1980, C/CS = Verhältnis der Konzentration der übersättigten Lösung zur Sättigungskonzentration

Die geschilderten Vorgänge durch Salze stellen eine häufige Schadensursache bei Putzen dar.

Tabelle 4: Hydratationsdrücke einiger Salze in Abhängigkeit von der Temperatur und Feuchte nach WINKLER 1973 und KNÖFEL 1980²²

Reaktion	rel. Luftfeuchte / %	Hydratationsdrücke in N/mm ² bei		
		0 °C	20 °C	60 °C
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50	107,2	57,5	0
	75	160,0	114,5	25,4
	100	219,0	175,5	92,6
		0 °C	20 °C	30 °C
$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50	5,0	1,9	0
	75	9,7	6,8	4,0
	100	14,6	11,7	9,2
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50	24,3	0	0
	75	63,7	28,4	9,4
	100	93,8	61,1	43,0

Aus der Literatur z. B. IÑIGUEZ 1967 ergibt sich, daß die Anionen Sulfat und Chlorid sowie die Kationen Calcium und Natrium bei der Bildung schädlicher Salze am häufigsten vertreten sind. DUTTLINGER 1990 stellt fest, „daß die Gipsschädigung, ... in der Gesamtbilanz der Verwitterung durch Salze unumstritten an erster Stelle steht“²³. Dies kann jedoch geographisch bedingt deutlich anders sein. Beispielsweise können Salzsäuren durch Natriumchlorid bei Gebäuden in Küstennähe auftreten.

2.1.2.3 Belastung von Putzen durch mikrobiologische Einflüsse

Die Belastung der historischen Bausubstanz durch biologische Einflüsse ist seit vielen Jahren bekannt. Das Vorliegen von Mikroorganismen auf Ziegeln, Natursteinen und zementgebundenen Baustoffen ist nachgewiesen. Die Mikroorganismen gliedern sich nach KRUMBEIN 1973 in:

- autotrophe Mikroorganismen²⁴ und
- heterotrophe Mikroorganismen²⁵.

²² KNÖFEL 1980: Tabelle 6, S. 54

²³ DUTTLINGER 1990: S. 171

²⁴ autotrophe Mikroorganismen - einzellige Lebewesen, die ihre Energie und Nährstoffe aus anorganischen Stoffen wie z. B. Tonmineralen und Gesteinen beziehen.

²⁵ heterotrophe Mikroorganismen - Kleinlebewesen, benötigen organisches Material, um ihren Bedarf an Energie und Nährstoffen ganz oder z. T. aus organisch gebundenem Kohlenstoff, Stickstoff oder anderen Elementen zu decken.

Sie bilden nach WARSCHEID 1994 folgende auf anorganischen Werkstoffen anzutreffende Gruppen:

autotrophe Mikroorganismen

- Photolithautotrophe Mikroorganismen (Algen, Cyanobakterien) verwenden Sonnenlicht als Energiequelle zum Wachstum, setzen dabei Sauerstoff frei und decken ihren Kohlenstoffbedarf durch Fixierung von CO₂ aus der Atmosphäre.
- Flechten leben in einer symbiotischen Assoziation aus einem Pilz und einer Alge oder Cyanobakterium. Der einheitliche Vegetationskörper wird formgebend vom Pilz geprägt. Er bezieht von der Alge organische Nährstoffe aus der Photosynthese und versorgt die Alge mit Mineralien, „*die er mittels tief ins Material eindringender Hyphen und Ausscheidung von Flechtensäuren aus dem Gestein gewonnen hat und schützt sie ferner vor Austrocknung und anderen ungünstigen Einflüssen*“²⁶. Flechten und Algen können durch Säurebildung Gesteine und Minerale anätzen und auflösen.
- Chemolithoautotrophe Mikroorganismen „*bedienen sich anorganischer Wasserstoffdonatoren ... (NH₄⁺, NO₂⁻, H₂S, Thiosulfat, elementarer Schwefel)*“²⁶ und können aus deren Oxidation Energie gewinnen. Sie scheiden dabei z. B. salpetrige Säure (Nitrosomonas, HNO₂), Salpetersäure (Nitrobacter, HNO₃) und Schwefelsäure (Thiobacillus, H₂SO₄) aus. Licht und organische Stoffe werden nicht benötigt. Dabei können einige Bakterien dieser Gruppe mixotroph wachsen, „*indem sie organische Nährstoffe für die Bildung von Zellsubstanz assimilieren (chemolithomixotroph)*“²⁶.

heterotrophe Mikroorganismen

- Chemoorganotrophe Mikroorganismen (Bakterien und Pilze) gewinnen Energie aus der Oxidation organischer Substrate („Wasserstoffdonatoren“), z. T. können Mikroorganismen dieser Gruppe „*Energie durch Oxidation von Metallkationen (Fe²⁺, Mn²⁺) gewinnen*“²⁶. Sie decken den Bedarf an Zellkohlenstoff durch autotrophe CO₂-Fixierung und sondern beispielsweise Apfel-, Ameisen-, Bernstein-, Butter-, Citronen-, Essig-, Fumar-, Glucon-, Glyoxyl-, Ketoglucon-, Milch-, Oxal-, Oxalessig-, 2-Oxoglucon-, 2-Oxoglutar Säure ab.

Bei der Besiedlung von Baustoffoberflächen durch Mikroorganismen spielt der pH-Wert des Substrates eine Rolle. Nach KRUMBEIN 1966 siedeln sich bevorzugt bei:

- niedrigen pH-Werten - Pilze

²⁶ WARSCHEID 1994: S. 106

- neutralem Milieu - heterotrophe Bakterien
- carbonatgepuffertem Milieu - autotrophe Bakterien an.

Die Schadensprozesse durch gesteinsbesiedelnde Mikroflora, ideale Bedingungen vorausgesetzt, laufen wie folgt ab.

Die ersten Besiedler von Gesteinsoberflächen sind nach SILVERMAN 1979 und WARSCHEID 1990 im allgemeinen phototrophe Mikroorganismen, die durch Ausscheidungen von Lipiden und kohlenhydratreichen Schleimen „die sukzessiv fortschreitende Entwicklung einer Gesteinsbiozönose, zu der auch die chemoorganotrophen Bakterien gehören“²⁷, ermöglichen. Diese Schleime können sogenannte Biofilme bzw. Biomatten bilden - Schichten, „die aus verschiedenen Mikroorganismen bestehen können. Bakterien und Pilze, die nahezu auf jeder Baustoffoberfläche anzutreffen sind, können lebensnotwendige Feuchtigkeit speichern. Bakterien z.B. bilden Schleimkapseln, deren Feuchtigkeit in der Lage ist, Luftschadstoffe, wie Staub oder SO₂ aufzunehmen. Man kann ihre Wirkung ähnlich einem Fliegenfänger beschreiben. Die Ausbildung von Biomatten können Initialprozesse für weitere Schädigungsprozesse auslösen.“²⁸ (GORETZKI 1994).

Chemoorganotrophe Bakterien entwickeln sich in milden schadstoffbeladenen Stadtklimaten nach KRUMBEIN 1966 und KRUMBEIN 1973 schneller als in ländlichen Klimaten und konnten bereits 3 Monaten nach Exposition der Baustoffe in der Umwelt nachgewiesen werden, während sich autotrophe Bakterien (z. B. nitrifizierende Bakterien) langsamer vermehren und nach SAND 1989 für eine vergleichbare Entwicklung mehrere Jahre benötigen.

Nitrifizierende Mikroorganismen sind von verschiedenen Autoren nachgewiesen worden, z. B. von MILDE 1983, KIRSTEIN 1986 und SAND 1989. Jedoch war die heterotrophe Mikroflora aufgrund ihrer schnelleren Entwicklung stets dominierend. Dennoch konnte SAND 1989 eine völlige Durchwachsung von Schlaitdorfer Sandstein mit nitrifizierenden Mikroorganismen am Kölner Dom nachweisen. Zusammenfassend sind die Ergebnisse von SAND 1989 in Bild 8 dargestellt. Es zeigt die Abhängigkeit der vorgefundenen Zellzahlen vom pH-Wert und der Bohrkerntiefe des untersuchten Gesteinmaterials.

WARSCHEID 1994 berichtet, daß entgegen einiger früherer mikrobiologischer Arbeiten im Rahmen jüngster Untersuchungen keine schwefelsäurebildenden Bakterien an Natursteinbauwerken in Deutschland nachgewiesen wurden.

²⁷ WARSCHEID 1990: S. 8

²⁸ GORETZKI 1994: S. 199

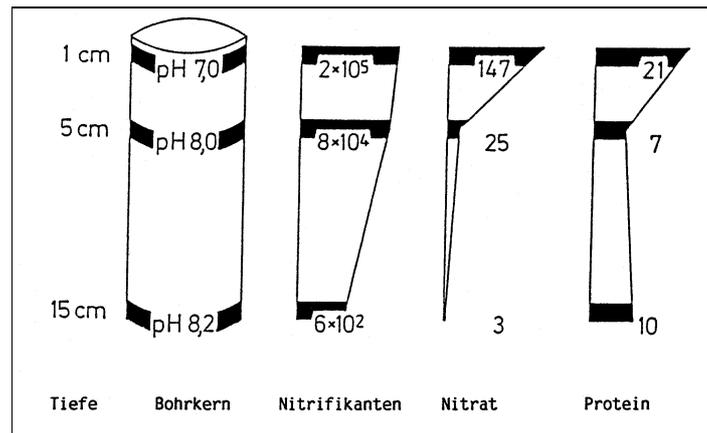


Bild 8 : „Besiedlung eines Bohrkerns aus Schlaitdorfer Sandstein mit Nitrifikanten in 1 cm, 5 cm und 15 cm Gesteinstiefe
Nitrat ($\mu\text{g}/\text{kg}$); Protein ($\mu\text{g}/\text{kg}$), Nitrifikantenzahl; (Zellen/mg Protein, bestimmt: MPN-Technik)^{29, 30} (SAND 1989)

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen stellt nach WARSCHEID 1994 für die Mikroorganismen in der Regel kein Problem dar, da die Nährstoffansprüche autotropher und heterotropher Mikroorganismen „durch den Eintrag organischer Luftschadstoffe aus Hausbrand, Kraftverkehr und Industrie sowie biogener Quellen, z. B. in Form von aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, gedeckt“³¹ werden. Nährstoffkonzentrationen von „ 10^{-5} - 10^{-6} molar“³² reichen nach KRUMBEIN 1973 aus, „um Stoffwechsel und Fortpflanzung von Mikroorganismen zu erlauben“³².

Für die Entstehung von Schäden an anorganischen Werkstoffen durch Biodeteriorationsprozesse³³ sind gewisse Bedingungen erforderlich:

- Der pH-Wert des Substrates sollte nach WARSCHEID 1990 und WARSCHEID 1994 in einem Bereich zwischen 5,5 und 8,0 liegen.
- Es sollte ein ausgeglichenes Klima, moderat warm und feucht wie im Herbst und Frühjahr, herrschen. Eingeschränkt lassen sich im Winter mikrobielle Aktivitäten feststellen, während sie bei trocken-warmen Bedingungen im Sommer kaum nachzuweisen sind.

²⁹ SAND 1989: S. 38

³⁰ nach Auskunft der Autoren wurde der Nitratgehalt, anders als in der Bildunterschrift angegeben, in $\mu\text{g}/\text{g}$ bestimmt. 147 $\mu\text{g}/\text{g}$ Nitrat der äußersten Schicht des Bohrkernes entsprechen 0,0147 M.-% Nitrat.

³¹ WARSCHEID 1994: S. 109

³² KRUMBEIN 1973: S. 63

³³ Biodeterioration - durch biologische Lebensformen bedingter Angriff einer Sache. In diesem Fall von Baustoffen, dieser Vorgang wird auch als Biokorrosion bezeichnet.

- Die Baustoffe sollten „eine hohe Porosität (ab ca. 18 Vol.-% durchschnittliche Porenradien zwischen 1-10 μm)“³¹ aufweisen. „Bei Werkstoffen mit Porenmaxima im Bereich von 1-2 μm bzw. im Extremfall bei dichtgebrannten Gläsern kann die mikrobielle Ansiedlung und damit durch sie ausgelöste Schadensprozesse häufig erst im Schutz oberflächlicher Gesteinsschalen bzw. Krusten und korrosionsbedingter Wettersteinschichten erfolgen.“³¹

Es ist jedoch anzumerken, daß die Mikroorganismen aufgrund ihrer flexiblen Nährstoffansprüche und ihrer Fähigkeit zur Ausbildung materialaufliegender bzw. materialdurchdringender schleimiger Biofilme in der Lage sind, den folgenden Einflüssen wirksam zu begegnen:

- Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen
- ionisch-osmotischen Störungseinflüssen
- Nährstofflimitierungen.

Verschiedene Autoren, z. B. SAND 1989, geben als Voraussetzung für eine „akute Gefährdung von Bauwerken durch mineralsäurebildende Mikroorganismen Zellzahlen von etwa $10^6/\text{cm}^2$ Oberfläche“³⁴ an. Liegen die Zellzahlen in diesem Bereich oder höher, sind binnen weniger Jahrzehnte schwere Schäden am Bauwerk zu erwarten. Bei geringeren Besiedlungszahlen ist zwar auch ein Angriff zu erwarten, „jedoch ist dessen Stärke so gering, daß Schäden erst nach vergleichsweise langen Zeiträumen erkennbar werden.“³⁴

Aufgrund der von WARSCHIED 1994 und SAND 1989 angegebenen Voraussetzungen für mikrobiellen Befall lassen sich für Kalkputze folgende Abschätzungen treffen:

besiedlungshindernde Faktoren:

- Kalkmörtel weisen eine Porenverteilung auf, die ihr Porenmaxima bei 0,1-1 μm hat. Dies stellt für eine Besiedlung einen ungünstigen Bereich dar.
- Der hohe pH-Wert des Bindemittels, das bei historischen Kalkputzen meist 20-50 M.-%³⁵ des Kalkputzes ausmacht. Der pH-Wert des nicht carbonatisierten Bindemittels ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) beträgt nach HANDBOOK 73 pH 12,6³⁶. Als CaCO_3 vorliegend

³⁴ SAND 1989: S. 39

³⁵ WISSER 1989, S. 19

³⁶ HANDBOOK 73: S. 8-35. Der pH-Wert schwankt im Temperaturbereich 0 - 30 °C zwischen 13,4 - 12,3, der angegebene Wert von 12,6 gilt für 20 °C.

finden sich nach ALEXEJEW 1976 pH-Werte zwischen pH 8,3-8,6³⁷ und bei NEY 1966 „für reine Lösung von CaCO_3 “ ein „pH-Wert von 9,73“³⁸.

- Kalkputze können bei Sulfatisierung und Bewitterung absanden; hiermit tritt ein Verlust besiedelter Bereiche auf.

besiedlungsfördernde Faktoren:

- Die historischen Kalkputze können Porenvolumina von 10-15 Vol.-% mit Porenvolumina $> 1 \mu\text{m}$ aufweisen, siehe BÖTTGER 1994.
- Die Sulfatisierung der Kalkputze, begleitet von Gipsbildung, senkt den pH-Wert bei völliger Umwandlung des Bindemittels (CaCO_3) in $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ auf Werte zwischen pH 7,0-7,7³⁹, siehe MIDDENDORF 1994.
- Risse und hohlliegende Putzpartien historischer Putze. Häufig sind die netzförmigen, wenn auch später wieder verheilten, Risse der Erhärtungsphase der historischen Putze Ausgangspunkte für spätere Schwachstellen im Gefüge.

Die Höhe der von LIS 1990 bestimmten Immissionsraten von $15,2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ bei Sulfat und von $9,6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ bei Nitrat⁴⁰, siehe auch Kapitel 2.1.2.2, machen es schwierig, durch mikrobielle Korrosion bedingte Schadstoffgehalte in Putzen von immissionsbedingten Einträgen zu trennen.

2.2 Ursachen für Schäden durch Restaurierungsmörtel

2.2.1 Allgemeines

Bei der Restaurierung historischer Kalkputze ist die Verwendung von Materialien erforderlich, die mit den Kalkmörteln und dem Untergrund verträglich sind. Eine sorgfältige Untersuchung der Altsubstanz ist die Voraussetzung für die Entwicklung von Mörteln, die in ihren Eigenschaften an die historischen Mörtel und an den Putzuntergrund angepaßt sind.

Ein Hilfe hierzu bieten die innerhalb einer Arbeitsgruppe von Wissenschaftlern und Fachleuten aus Denkmalpflege, Handwerk und Industrie erarbeiteten Prüfverfahren und Anforderungen an Mörtel und Putze für Restaurierungszwecke, die von KNÖFEL

³⁷ ALEXEJEW 1976, S. 48

³⁸ NEY 1966: S. 13

³⁹ MIDDENDORF 1994: S. 193, pH-Werte von Gipsmörteln

⁴⁰ LIS 1990: Mittelwerte aus gebietsbezogenen Meßwerten (Ruhrgebiet, Eifel, Weserbergland, Teutoburger Wald/Eggegebirge) der Jahre 1984 -1989, Tabelle 2 , S. 35

1993 veröffentlicht wurden. Tabelle 5 listet die Prüfverfahren und Anforderungen auf, die daraus an Putzmörtel zu stellen sind.

Die Entwicklung von Mörteln, die diesen Anforderungen genügen, entbindet nicht von einer fehlerfreien Verarbeitung und Nachbehandlung, siehe Kapitel 2.1.1.

Tabelle 5: „Putzmörtel; wesentliche Eigenschaften, Prüfverfahren, Anforderungen“⁴¹ nach Knöfel 1993⁴²

Gruppe	Putz-Mörtel	Eigenschaft / Kurzzeichen	Anforderung / Richtwert
A erforderlich	Frischmörtel	Konsistenz	Ausbreitmaß: $17 \pm 0,5$ cm, bzw. nach Anforderung
		Wasserrückhaltevermögen - WRV	hoch bei stark saugenden, niedrig bei schwach saugendem Putzgrund
	Festmörtel ohne Verbund	dynamischer E-Modul - E_{dyn}	kleiner als Putzgrund, siehe Abschnitt 2.2.2 ⁴³
		Schwinden und Quellen - ϵ_q, ϵ_s	möglichst klein
		Zugfestigkeit - β_Z	siehe Abschnitt 2.2.2
		Wasseraufnahmekoeffizient - ω	$\leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ (wasserabweisend) $\leq 2,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ (wasserhemmend)
	Festmörtel mit Verbund	Haftzugfestigkeit - β_{HZ}^1	Kohäsionsbruch, Abriß im Putzgrund oder $\beta_{HZ} \geq 0,1 \text{ N/mm}^2$
		Druckfestigkeit - $\beta_{D,G}^1$	kleiner als Putzgrund, siehe Abschnitt 2.2.2
B wünschenswert	Frischmörtel	Rohdichte - ρ_1	keine
		Luftgehalt - L	keine
	Festmörtel ohne Verbund	Druck- und Biegezugfestigkeit - β_D, β_{BZ}	Druckfestigkeit kleiner als Putzgrund
		Wasserdampfdurchlässigkeit	möglichst groß
		Ausblühverhalten	möglichst wenig Ausblühungen
		Wärmedehnungskoeffizient - α_T	$6 \dots 12 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
		Frost-Tauwechsel-Widerstand (nur Sockelputze)	keine oder nur geringe Absplitterungen, keine größeren oder durchgehenden Risse
	Austrocknungsverhalten		
	Festmörtel mit Verbund	Verbundverhalten Rißneigung	frei von Rissen

¹ Erforderlich, wenn keine Prüfergebnisse oder entsprechende Erfahrungen an gleichen oder ähnlichen Putzgründen vorliegen

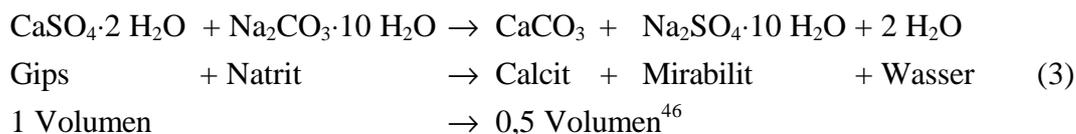
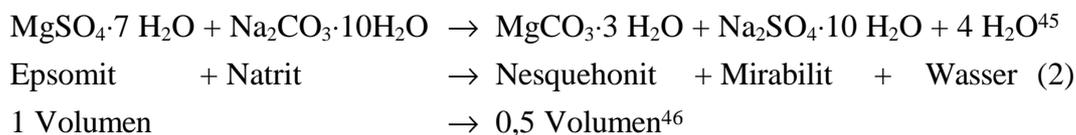
⁴¹ KNÖFEL 1993: S. 107

⁴² Diese Tabelle entspricht, bis auf die Angabe der Kennzahl des jeweiligen Prüfverfahrens, der Vorlage.

⁴³ SCHUBERT 1993: S. 109 - 111

2.2.2 Schäden durch Reaktionen mit Alkalisalzen

Trotz Anpassung der Restaurierungsmörtel entsprechend der Tabelle 5 an die Eigenschaften der historischen Substanz kann es zur Ausbildung von Schäden kommen. In solchen Fällen kann die Auswahl eines ungeeigneten Bindemittels die Ursache für nachfolgende Schäden sein, weil Bindemittel zum Einsatz kamen, die deutliche Gehalte an Alkalien, sprich K_2O und Na_2O , bzw. deren Sulfaten, Carbonaten oder Chloriden aufwiesen. Beispielsweise können hydraulische Kalke, hochhydraulische Kalke⁴⁴ und Zemente nennenswerte Alkaligehalte enthalten. Dies kann zur Bildung von Ausblühungen führen, Beispiele hierfür nennen ZEHNDER 1982 und ARNOLD 1989. Begünstigend wirkt sich Wassereintrag ins Mauerwerk, z. B. durch Regen oder aufsteigende Feuchte, aus. In Wasser gelöste Alkalicarbonate können mit dem sekundär entstandenen Gips oder Magnesiumsulfat zu Alkalisulfaten reagieren. ARNOLD 1981 führt hierzu die folgenden Reaktionen auf, die in Gegenwart von Wasser ablaufen:



weshalb bei der Auswahl der Bindemittel darauf zu achten ist, daß nur alkaliarme Varianten Verwendung finden. Vorteilhaft in dieser Hinsicht können Bindemittelmischungen von alkaliarmen Zementen mit Weißkalkhydrat⁴⁷ oder Wasserkalkhydrat sein. Sie weisen nach Untersuchungen von WINNEFELD 1996 in der Summe wesentlich weniger Alkalien auf als hydraulische Kalke.

Alkalien für die in den Reaktionsgleichungen 2 und 3 aufgeführten Reaktionen können auch aus der Bausubstanz stammen. Beispielsweise können sie durch Austauschreak-

⁴⁴ Die Bezeichnungen Wasserkalk, hydraulischer Kalk, hochhydraulischer Kalk stammen aus der Vorgängernorm. Seit der Neufassung DIN 1060 werden Wasserkalk als Weißkalk 70 (CL 70), hydraulischer Kalk als hydraulischer Kalk 2 (HL 2) und hochhydraulischer Kalk als hydraulischer Kalk 5 (HL 5) bezeichnet. Zusätzlich wurde noch hydraulischer Kalk 3,5 (HL 3,5) in die DIN 1060 aufgenommen. Siehe hierzu auch Tabelle **AFehler! Textmarke nicht definiert.** im Anhang.

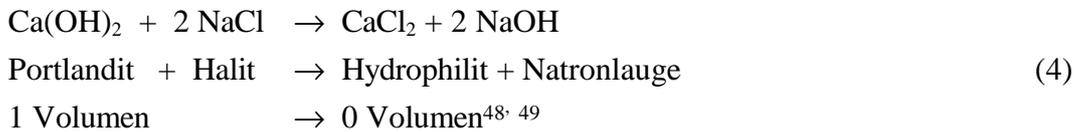
⁴⁵ ARNOLD 1981: S. 152

⁴⁶ Dichten, Molmassen und Molvolumina der Verbindungen sind in Tabelle **AFehler! Textmarke nicht definiert.** im Anhang aufgeführt.

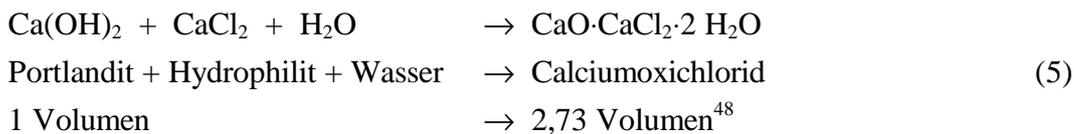
⁴⁷ Weißkalkhydrat (WKH) wird in der Neufassung der DIN 1060 Teil 1 (DIN 1060) als Weißkalk 90 (CL 90) oder Weißkalk 80 (CL 80) bezeichnet. Die Ziffer in der Benennung des Weißkalkes bezieht sich auf den geforderten $CaO + MgO$ -Gehalt in M.-%. In der vorhergehenden Fassung der Norm wurde diese Unterscheidung nicht getroffen. Hier galt die generelle Forderung $CaO + MgO$ muß ≥ 80 M.-% sein. Siehe hierzu auch Tabelle **AFehler! Textmarke nicht definiert.** im Anhang.

tionen von Natrium durch Calcium aus Tonmineralen oder bei der Verwitterung von Feldspäten freigesetzt werden.

In Küstennähe kommen z. T. erhebliche Gehalte an Halit (NaCl) vor. Halit kann mit noch nicht carbonatisiertem Portlandit aus Luftkalken, hydraulischen Kalken und Zementen nach LEA 1956 nach folgender Gleichung zu Calciumchlorid reagieren.



Diese Reaktion findet in Gegenwart von Wasser statt und ist begleitet von einer Volumenabnahme, da sowohl Hydrophililit als auch Natronlauge starke Trocknungsmittel sind. Sie kristallisieren unter normalen Umgebungsbedingungen nicht. Hydrophililit kann mit Calciumaluminaten Friedel'sches Salz bilden, siehe Kapitel 2.2.4.1, oder aber bei Gehalten von > 5 M.-% und Temperaturen von < 20 °C mit Portlandit in Gegenwart von Feuchte Komplexsalze bilden (CHATTERJI 1978). KNÖFEL 1983 konnte die Bildung von Calciumoxichlorid nachweisen. Dieses bildet sich nach folgender Gleichung:

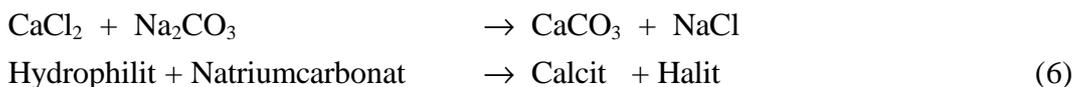


Die Bildung von Calciumoxichlorid ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden, die zu Treiberscheinungen führen kann. Über Schäden, die ihre Ursache in der Bildung von Komplexsalzen bzw. von Calciumoxichlorid aus Hydrophililit und Portlandit finden, berichten SMOLCYK 1969, CHATTERJI 1978 und KNÖFEL 1983.

Nach GMELIN 1957 existieren verschiedene Calciumoxichloride; danach sind bei Temperaturen zwischen 0 °C und 10 °C $\text{CaCl}_2 \cdot 3 \text{CaO} \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$ und zwischen 10 °C und 50 °C $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CaO} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ und $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CaO}$ mit 4 oder 5 H_2O und > 50 °C $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ stabil⁵⁰. Diese Aussage gilt für die Bildung der Calciumoxichloride aus wäßrigen Lösungen.

In PÜHRINGER 1992 und PÜHRINGER 1993 ist die Bildung des $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ bei Raumtemperatur aus Lösungen beschrieben, deren Konzentration im Gleichgewicht mit der bestehenden rel. Luftfeuchte steht. Dabei werden seiner Meinung nach Kalkmörtel durch die Bildung dieses Doppelsalzes angegriffen.

Bei Carbonatisierung der Luftkalke kommt es in Gegenwart von Natriumcarbonat zur Bildung von Halit aus Hydrophililit (ARNOLD 1981) nach folgender Reaktion:



⁴⁸ Dichten, Molmassen und Molvolumina der Verbindungen sind in Tabelle A Fehler! Textmarke nicht definiert. im Anhang aufgeführt.

⁴⁹ Die beiden Verbindungen sind sehr stark hygroskopisch und liegen deshalb unter normalen Umweltbedingungen gelöst vor.

⁵⁰ GMELIN 1957: Calcium, Teil B, Lieferung 2, S. Ca [B] 547 - 548 und S. Ca [B] 551 - 552

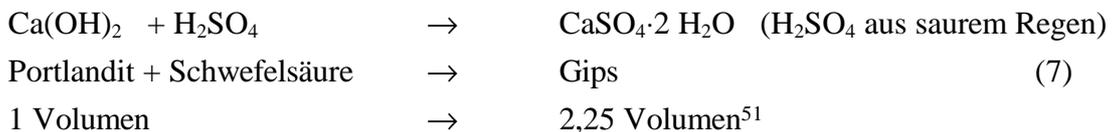
Damit steht nach der Carbonatisierung Halit wieder für die Bildung von Ausblühungen und damit für die Entstehung weiterer Schäden zur Verfügung.

Die genannten Reaktionen, siehe Gleichungen 4-6 zeigen, daß Mörtel auf der Basis von Weißkalkhydrat (WKH) durch Kristallneubildungen und damit durch Kristallisationsdruck geschädigt werden können.

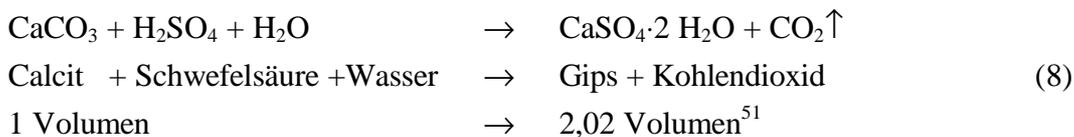
2.2.3 Schadensreaktionen mit Sulfaten

2.2.3.1 Gipsbildung

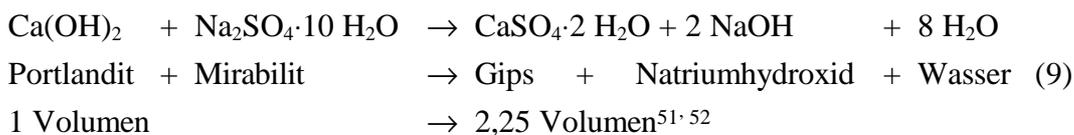
Bei Einwirkung von sulfathaltigen Wässern auf nicht carbonatisierte Bindemittel (Luftkalke, hydraulische Kalke, Zemente), wie z. B. durch Niederschläge bei SO₂-haltiger Luft, kann es zur Bildung von Gips kommen. Diese Reaktion verursacht erhebliche Volumenvergrößerungen:



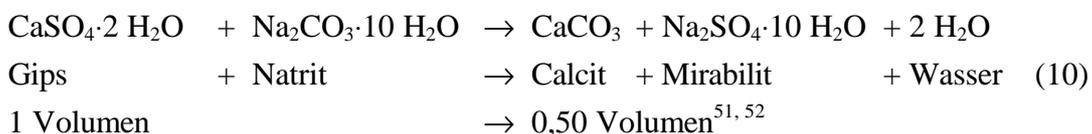
Ebenso ist bei carbonatisiertem Bindemittel durch die Bildung von Gips eine erhebliche Volumenvergrößerung zu verzeichnen:



Bezugnehmend auf ARNOLD 1981 können im historischen Bestand vorliegende Alkaliverbindungen in Gegenwart von Feuchte folgende Reaktionen verursachen, die sowohl große Volumenzunahmen als auch -abnahmen bewirken:



Im carbonatisierten Zustand:



Ähnliche Reaktionen können mit Alkalinitraten und -chloriden erfolgen.

⁵¹ Dichten, Molmassen und Molvolumina der Verbindungen sind in Tabelle A**Fehler! Textmarke nicht definiert.** im Anhang aufgeführt.

⁵² Bei der Berechnung der Volumenänderung wurden topochemische Reaktionen der schwerlöslichen Phasen mit den Lösungsphasen der Reaktionspartner zugrundegelegt. Tabelle A**Fehler! Textmarke nicht definiert.** im Anhang enthält die Dichten, Molmassen und Molvolumina der Verbindungen.

Die beschriebenen Vorgänge führen wenigstens zu einer Minderung der Festigkeitseigenschaften der Mörtel. Diese Reaktionen sind insbesondere bei Hinterfüllmörtel zu beachten, da sie in der Regel mit erhöhten Wasserzugaben verarbeitet werden und somit ein poröses Gefüge mit hohem Anteil an Kapillarporen⁵³ aufweisen. Ein hoher Anteil von Kapillarporen erleichtert das Eindringen reaktiver Verbindungen und somit die Entstehung von Schäden.

2.2.3.2 Ettringitbildung

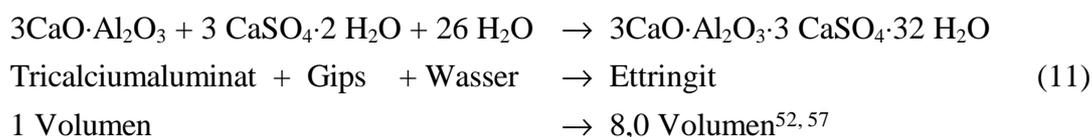
Wasserkalke, hydraulische Kalke, hochhydraulische Kalke⁴⁴ und Zemente enthalten hydraulisch reagierende Calciumsilicat- und Calciumaluminatverbindungen, die zur Entwicklung höherer Festigkeiten führen. STRÜBEL 1992 stellt deren Zusammensetzung und Festigkeitsentwicklung abhängig vom Hersteller zusammen. Demnach enthalten die Kalke mit hydraulischen Anteilen im Mittel die in Tabelle 6 aufgeführten Zementklinkerphasen. Die von STRÜBEL 1992 bestimmten Festigkeiten der untersuchten Bindemittel entsprechen den Anforderungen der DIN 1060.

⁵³ Kapillarporen sind Poren mit dem Radius von 10 nm - 10 µm

Tabelle 6: Mittlere mineralische Zusammensetzung der von STRÜBEL 1992⁵⁴ untersuchten Wasserkalke, hydraulischen Kalke und hochhydraulischen Kalke⁴⁴

Bindemittelbestandteil	Wasserkalkhydrate / M.-%	hydraulische Kalke / M.-%	hochhydraulische Kalke / M.-%
C ₂ S, C ₃ S ^{55, 56}	29	26	34
C ₃ A, C ₂ (A, F) ^{55, 56}	1	4	7
Portlandit	63	41	13
Calcit	6	24	34
Quarz	0	0	3
Anhydrit	0	0	4
Sonstige	2	6	4

Werden Kalke mit hydraulischen Anteilen oder Zemente als Bindemittel für Haftmörtel, Hinterfüllmörtel oder Ersatzputze eingesetzt, können Sulfate im historischen Bestand die nachfolgend aufgeführten treibend wirkenden Kristallneubildungen verursachen. Dies betrifft einerseits die Kontaktzone historischer Mörtel/Ersatzmörtel, andererseits auch den gesamten Ersatzmörtel, wenn, bedingt durch Transportvorgänge während der Befeuchtungs- und Trocknungszyklen, sulfathaltige Lösungen in den Ersatzmörtel wandern. Sulfate können mit Tricalciumaluminaten zur Ettringitbildung gemäß Gleichung (11) führen. Sie ist mit erheblichen Volumenvergrößerungen verbunden und kann zu Treiberscheinungen führen.



Die Bildung von Ettringit ist nicht an die Gegenwart von Tricalciumaluminat gebunden. Kommt Sulfat z. B. mit

- Calciumaluminat und Portlandit,
- reaktionsfähigem Al₂O₃ und Portlandit,
- Al(OH)₃ und Portlandit.

⁴⁴ siehe Fußnote ⁴⁴, S. 35

⁵⁴ STRÜBEL 1992: S. 21, die Daten sind aus der dort befindlichen Abb. 3 mit den Rundungsfehlern übernommen

⁵⁵ Die Zementklinkerphasen sind in der in der Zementindustrie üblichen Kurzschreibweise angegeben, dabei ist C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃ und F = Fe₂O₃

⁵⁶ Die hydraulischen Kalke enthalten z. T. Calciumaluminatferrathydrate, lediglich die hochhydraulischen Kalke können zudem Calciumaluminatferrathydrate enthalten, weil sie in der Regel aus einer Mischung aus Luftkalk mit Portlandzement hergestellt werden. Ebenso dominiert normalerweise C₂S, bei den hochhydraulischen Kalken mit Zusatz von Portlandzement herrscht überwiegend C₃S vor.

⁵⁷ Dichten, Molmassen und Molvolumina der Verbindungen sind in Tabelle A**Fehler! Textmarke nicht definiert.** im Anhang aufgeführt.

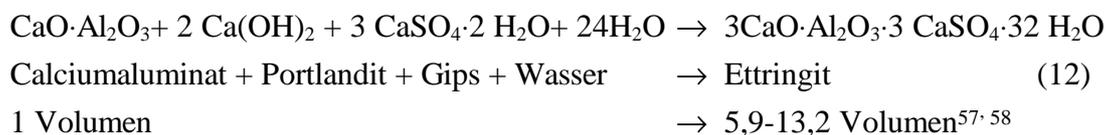
- Calciumaluminathydrat

in Kontakt, kann dies ebenfalls zur Bildung von Ettringit zu führen. Schäden, die durch Ettringitbildung in einem Tonmineralknöllchen enthaltenden Kalk/Gips-Putz eintraten, beschreibt MÜNCHBERG 1970. In Laborversuchen synthetisierte KOLLMANN 1978 Ettringit aus verschiedenen Tonmineralen (Kaolinit, Halloysit, Muskovit und Montmorillonit), Portlandit und $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$.

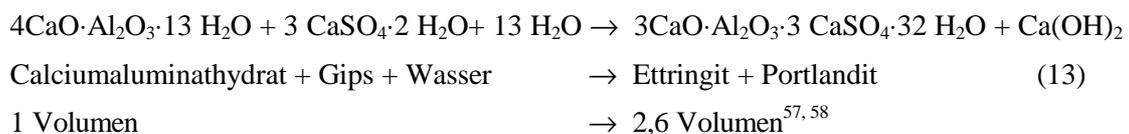
Die Möglichkeit der Ettringitbildung aus Tonmineralen ist deshalb von Bedeutung, weil die Zuschläge historischer Mörtel und Putze häufig aus ungewaschenen Sanden bestehen, die Tonminerale enthalten können. Deshalb sind Reaktionen in der Kontaktzone mit sulfathaltigen Ersatzmörteln nicht auszuschließen.

Die Bildung von Ettringit kann auch aus dem Calciumaluminat erfolgen, welches hydraulische und hochhydraulische Kalke enthalten können. Die Reaktionsgleichung (11) ändert sich wie folgt:

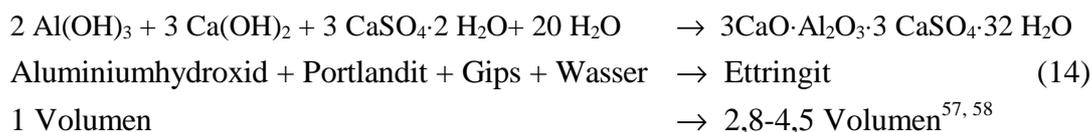
Bildung von Ettringit aus Calciumaluminat



Bildung von Ettringit aus Calciumaluminathydrat

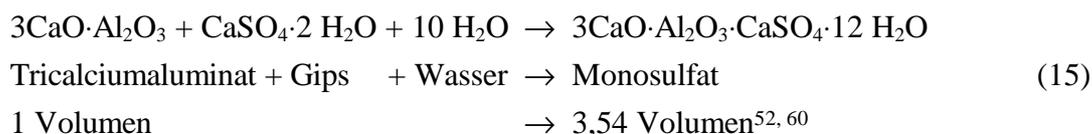


Bildung von Ettringit aus $\text{Al}(\text{OH})_3$ erfolgt in Anlehnung an KOLLMANN 1978⁵⁹ nach folgender Reaktion:



Den Reaktionsgleichungen ist zu entnehmen, daß sich bei der Ettringitbildung aus den oben genannten Reaktionspartnern Volumenvergrößerungen ergeben, die zwischen dem 2,6-13,2fachen der Ausgangssubstanzen liegen. Diese Volumenzunahmen sind in jedem Fall materialunverträglich und können zu Schäden führen.

Möglich ist auch die Bildung von Monosulfat. Auch diese Reaktion führt zu einer, wenn auch geringeren, Volumenzunahme als beim Ettringit:



⁵⁸ Bei der Bildung des Ettringits wird von topochemischen Reaktionen ausgegangen. Der höhere Wert geht vom Transport der Reaktionspartnern in der Lösungsphase aus, während der niedrigere Wert den entstehenden Hohlraum beim „Weglösen“ des Portlandits berücksichtigt.

⁵⁹ Statt dem von KOLLMANN 1978 zu Synthese zugegebenen Halbhydrat kann auch Gips verwendet werden, die Reaktionsgleichung nimmt dann diese Form an.

nungsreaktionen. Nach MEHTA 1973, MEHTA 1976 und MEHTA 1982 findet die Bildung von Ettringit in Gegenwart von Portlandit kolloidal statt, während er andernfalls in Form dünner Nadeln kristallisiert. In jedem Fall geht die Bildung von Ettringit seiner Meinung nach ausschließlich über die Lösungsphase vor sich.

Der Quellmechanismus infolge Ettringitbildung ist nach CHARTSCHENKO 1995 wesentlich „komplizierter und vielfältiger“⁶⁵, als nur mit Hilfe der Kristallisations- oder Quelltheorie beschrieben. Seinen Untersuchungen zufolge (CHARTSCHENKO 1993 und CHARTSCHENKO 1995) spielt bei der Bildung des Ettringits der pH-Wert die entscheidende Rolle. So finden abhängig vom pH-Wert folgende Ausbildungen des Ettringits statt:

- pH-Werte < 9,0: Zersetzung des Ettringits
- pH-Wert 9,0-10,5: Bildung eines gleichförmigen Netzwerks nadelförmiger Kristalle von geringem Raumausfüllungsgrad mit Längen/Dicken-Verhältnissen, die mit fallendem pH-Wert von 1:40 auf 1:5 abnehmen
- pH-Wert 10,5-11,0: Bildung eines gleichförmigen Netzwerks nadelförmiger Kristalle von geringem Raumausfüllungsgrad mit Längen/Dickenverhältnissen von etwa 1:40-1:47
- pH-Wert 11,0-12,0: „typischer nadelförmiger kristalliner Ettringit („klassischer Ettringit“)⁶⁶
- pH-Wert 12,0-12,5: Entstehung eines räumlich-strahlenförmigen Ettringitgebildes, „dessen Kristallfasern wesentlich dünner und kürzer sind“⁶⁷
- pH-Wert 12,5-13,0: Ettringit tritt „teilweise in röntgenamorphen, körnchenförmigen Aggregaten, teilweise in faserförmigen Kristallen auf“⁶⁷
- pH-Werte > 13,0: Ettringit erscheint „nur noch in röntgenamorphen bzw. gelartigen, körnchenförmigen Aggregaten“⁶⁷

Die Ettringitbildung bei pH-Werten > 11,5 verläuft nach CHARTSCHENKO 1995 topochemisch auf der Oberfläche; dies führt zu Quellvorgängen oder Treiberscheinungen. Bei niedrigen pH-Werten bildet sich Ettringit ausschließlich über die Lösungsphase in Poren, was zu einem dichten Gefüge und nur geringfügigen Treib- oder Quellvorgängen führt.

Ettringit bildet eine Mischkristallreihe mit Fe₂O₃-haltigem Ettringit; dabei ist das Kristallwachstum bei Al₂O₃-haltigem Ettringit ausgeprägter und führt deshalb zu Schäden. SMOLCZYK 1961, LOCHER 1986 und STARK 1994 bestätigen das langsamere Wachstum des sich aus der Lösungsphase bildenden, Fe₂O₃-haltigen Ettringits; es kommt dabei nicht zu Treiberscheinungen.

Die Strukturformel des Ettringits lautet nach TAYLOR 1968:

⁶⁵ CHARTSCHENKO 1995: S. 58

⁶⁶ CHARTSCHENKO 1993: S. 176

⁶⁷ CHARTSCHENKO 1995: S. 78 - 84



Ettringit ist unter normalen Bedingungen nach GHORAB 1979 bis zu einer Temperatur von 74 °C stabil, rechnerisch ergeben sich nach MCELOV-PETROSIAN 1966 70 °C. Bei höheren Temperaturen zerfällt er zunächst in Monosulfat und Gips, bei weiterer Erwärmung zu Gips und C_3AH_6 . Dabei bleibt zum Teil die Morphologie erhalten. Bei Feuchtezufuhr nach der Abkühlung kann die Rückbildung zum Ettringit einsetzen.

Ettringit löst sich in reinem Wasser inkongruent und in Gips-, Calciumhydroxid- und Alkalilösungen kongruent. Die Löslichkeit von Ettringit ist in CaO-haltigem Wasser mit 27 mg CaO/l nur gering (LEA 1970) und geht bei höheren CaO-Gehalten gegen Null. Die Gegenwart von Alkalihydroxiden kann bei Konzentrationen ab 2-4 M.-% NaOH⁶⁸ nach LEA 1970 zur Zersetzung des Ettringits zu Monosulfat führen. Ebenso zerstören Lösungen mit 5 M.-% Natriumcarbonat sowohl den Ettringit (VAN AARDT 1975) als auch das Monosulfat.

Ettringit carbonatisiert nach KUZEL 1989 und NISHIKAWA 1992 langsamer als die C-S-H-Phasen, Monosulfat oder Portlandit. Dabei unterstützt Feuchtigkeit und insbesondere die Gegenwart von Alkalihydroxiden die Carbonatisierung von Ettringit. Bei der Carbonatisierung zerfällt der Ettringit nach GHORAB 1979 in Bayerit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Gips und Aragonit.

Die Carbonatisierung kann bei wärmebehandelten Betonen, insbesondere wenn der vom DAfStB 1989 empfohlene Grenzwert von 60 °C überschritten wurde, zum Zerfall von Monosulfat führen (KUZEL 1989). Infolge dieser Zersetzung und der dabei eintretenden Freisetzung von Gips kann es zur Bildung von Ettringit aus noch nicht carbonatisiertem Monosulfat und damit zu Treiberscheinungen kommen. Nach LUDWIG 1991 sollte im technischen Prozeß eine Temperatur von 70 °C keinesfalls überschritten werden, da sonst die oben genannten Schäden die Folge sein können.

2.2.3.3 Thaumasilbildung

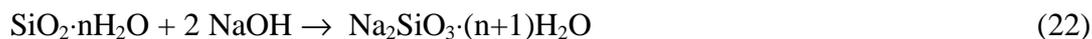
Mit dem Einsatz von calciumaluminatarmen oder -freien Bindemitteln kann die Bildung von Ettringit vermieden werden. Unter geeigneten Bedingungen, d. h. bei dauernd tiefen Temperaturen (< 10 °C) und ständiger Durchfeuchtung, kann sich - aus Calciumsilicaten, Calciumsilicathydraten oder reaktivem SiO_2 und Portlandit in Gegenwart von Sulfaten und Calciumcarbonat - Thaumasil bilden. Beispiele für solche Schäden nennen z. B. MÜNCHBERG 1970, LUKAS 1975, KOLLMANN 1978, CRAMMOND 1985 und WERNER 1986. Thaumasil bildet sich nach folgender Gleichung:

⁶⁸ Das entspricht einer 0,5-1 n NaOH-Lösung. Die Porenlösung im Beton besteht nach GUNKEL 1983 aus einer 0,2-0,4 n Alkalilauge.

> 28 °C. Friedel'sches Salz bildet keine Mischkristalle mit Monosulfat. Nach TAYLOR 1991 existiert jedoch eine geordnete Verbindung von $(6\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4\cdot \text{CaCl}_2\cdot 24\text{H}_2\text{O})$, in der sich Cl-haltige Zwischenlagen mit SO_4^{2-} -haltigen abwechseln. Wie bei Ettringit oder Monosulfat bilden sich nach KUZEL 1968 aus $\text{C}_2(\text{A}, \text{F})^{76}$ Fe_2O_3 -haltige Varianten. Die Al_2O_3 - und Fe_2O_3 -haltigen Varianten zeigen nach KUZEL 1970 jedoch eine begrenzte Mischbarkeit.

2.2.4.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Bei der Verwendung von hydraulischen Kalken und Zementen mit Gesamtalkaligehalten von > 0,6 % Na_2O -Äquivalent⁷⁷ kann es zu Schäden durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kommen. Voraussetzungen für solche Reaktionen sind die Verwendung von Zuschlägen, die amorphe oder schlecht kristallisierte Kieselsäure enthalten, z. B. Opalsandstein oder reaktionsfähiger Flint (LOCHER 1973). Dabei können die Alkalien auch aus der historischen Substanz in den zementhaltigen Baustoff eindringen. Die Reaktion:



Kieselsäure + Natronlauge \rightarrow Alkalisilicat-Gel

läuft, nach BONZEL 1973 und BONZEL 1986, unter Volumenzunahme ab und führt zu typischen Schadensbildern wie trichterförmigen Absprengungen, feinen netzartigen oder strahlenförmigen Rissen (JOHANSEN 1994) bis hin zur Zerstörung. Teilweise ist das Austreten von Alkalisilicat-Gel aus Rissen zu beobachten.

Schäden durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion entstehen sehr langsam und führen abhängig von den Umweltbedingungen erst nach vielen Monaten oder Jahren zu Schäden. Erforderlich für die Entstehung von Schäden ist ständige Feuchte und Temperaturen zwischen 10-60 °C sowie die Gegenwart von Alkalihydroxid. Dabei stellt LUDWIG 1982 bei 40 °C einen besonders langsamen Ablauf der AKR fest. Die Reaktion wird durch Carbonatisierung unterbrochen.

2.3 Geeignete Bindemittel für Restaurierungsmörtel

Voraussetzung zur Vermeidung von Schäden durch Sulfateinwirkung ist die Verwendung von Bindemitteln, die keine schädlichen Kristallneubildungen ergeben. Beim Einsatz von hydraulisch erhärtenden Bindemitteln sollten nach MEHR 1986 nur solche

⁷⁷ Das Na_2O -Äquivalent ergibt sich aus dem Gehalt an Na_2O und K_2O des Bindemittels nach folgender Formel: Na_2O -Äquivalent = $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$. Der Faktor 0,658 ist das Verhältnis der Molmassen $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$; $61,979/94,203 = 0,658$

eingesetzt werden, die den bei der Hydratation abgespaltenen Portlandit sehr schnell binden und somit eine späte schädliche Ettringitbildung und Thaumasitbildung vermeiden. Damit sind auch die Reaktionen von Alkalisalzen mit Portlandit unterbunden. Bei kritischen Untergründen mit hohen Sulfatgehalten sollten nur Bindemittel verwendet werden, deren Eignung ggf. im Einzelfall geprüft wurde. Vorschläge für Prüfverfahren machen STÜRMER 1993 und HENKEL 1994.

Bei dem von HENKEL 1994 beschriebenen Verfahren werden Mörtel mit einem Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis von 1:3 hergestellt, denen 15 M.-% Gips bezogen auf das Bindemittel zugegeben wurde. Die Lagerung der Prüfkörper erfolgt bis zum Ausformen bei 20 °C und 95 % rel. Luftfeuchte (20/95), anschließend in 8 °C kaltem Wasser. Die Dehnung der Prüfkörper in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer wird ermittelt. Das Zertreiben der Prüfkörper, die Ausbildung von Rissen oder zu große Längenänderungen deuten die Unverträglichkeit eines Bindemittels mit Sulfaten an.

Für Restaurierungsmaßnahmen können aufgrund der bislang gemachten Aussagen folgende Bindemittel als geeignet angesehen werden:

Luftkalke für die Restaurierung von Kalkputzen, soweit keine hohen Alkaligehalte im historischen Material vorliegen. Der Nachteil der Luftkalke ist ihr hohes Schwinden welches (BÖTTGER 1994) als „Schwinden in der Form“ bestimmte. Es führt zur bekannten Neigung dieser Mörtel zur Ribbildung. Die Ribbildung ist abhängig vom Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis.

Im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereiches 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ wurde ein Bindemittel auf Basis **latent hydraulisch-puzzolanischer** Komponenten entwickelt, das sich bisher bewährt hat und nach PIEPER 1987 folgende Zusammensetzung aufweist:

- ca. 50 M.-% Hüttensand oder HOZ
- ca. 15 M.-% PZ-Klinker oder PZ
- ca. 17,5 M.-% Flugasche
- ca. 17,5 M.-% Traß

Dieses Bindemittel wird von der Fa. TUBAG, Kruft vertrieben, erhärtet relativ langsam und erzielt geringe Festigkeiten.

Zudem sind **Tonerdezemente** geeignet, da sie keine kalkreichen Calciumaluminat enthalten. Die wesentliche hydraulisch wirksame Phase ist Monocalciumaluminat. Bei der Hydratation bildet sich in der Hauptsache CAH_{10} . Die kalkarmen Calciumaluminat-hydrate bilden mit Sulfat keinen Ettringit und Monosulfat, ebenso ist die Bildung von Thaumasit ausgeschlossen.

Weitere in Frage kommende Bindemittel sind **hydraulische Kalke** mit niedrigem Alkali- und Calciumaluminatgehalt und **Hochofenzement mit hohem Hüttensandanteil** - beide Bindemittel können nach vorheriger Verträglichkeitsprüfung eingesetzt werden.

Ein weiteres Bindemittel mit hohem Sulfatwiderstand ist der auf heutige Hüttensande abgestimmte Sulfathüttenzement, der von TRAUTMANN 1992 und TRAUTMANN 1994 **HGZ** (Hüttensand-Gips-Zement) genannt wird.

Verträglichkeitsuntersuchungen im Rahmen eines Ringversuchs ergaben für HGZ, HOZ-Kalksteinmehl und den Tubag-Fertigmörtel einen hohen Sulfatwiderstand. Bindemittel auf Basis Wasserkalkhydrat (WaKH) bestanden diese Verträglichkeitsuntersuchung nicht. Seine Verträglichkeit mit hohen Gipsgehalten wurde verschiedentlich geprüft, siehe z. B. HENKEL 1994.

Im Rahmen dieser Dissertation sollen aufgrund der vorliegenden Verträglichkeitsuntersuchungen Bindemittel auf Basis HGZ, Tonerdezement und HOZ-Kalksteinmehl verwendet werden. Zusätzlich soll der Sulfatwiderstand dieser Bindemittel mit anderen Methoden überprüft werden.

3 Untersuchungsmethoden

3.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

3.1.1 Dichtebestimmung

Die Bestimmung der **Dichten** der verwendeten Stoffe fand mittels eines Helium-Pyknometers vom Typ AccuPyc 1330 der Fa. micromeritics statt.

3.1.2 Spezifische Oberfläche nach Blaine

Die Ermittlung der **spezifische Oberfläche** nach Blaine erfolgte nach dem Luftdurchlässigkeitsverfahren nach DIN EN 196 Teil 4 (Blaine Bestimmung). Dabei wurden die nach Kapitel 3.1.1 ermittelten Dichten der Bindemittel bei der Berechnung der spezifischen Oberfläche nach Blaine verwendet.

3.1.3 Lasergranulometrie

Die Bestimmung der **Partikelgrößenverteilung** im Bereich 0,5-175 μm wurde mit einem Lasergranulometer der Fa. Sympatec, Typ Helos, durchgeführt. Zur Anwendung kamen das Naßdispergiersystem Sucell 12CL mit Isopropanol als Dispergierflüssigkeit oder das Trockendispergiersystem Rhodos. Das Gerät besaß eine PC-Steuerung mit Helos-Software.

Mit der Dichte des untersuchten Stoffes kann aus der Korngrößenverteilung die spezifische Oberfläche berechnet werden. Nach Untersuchungen von FRIAS 1991 stellt die Lasergranulometrie ein alternatives Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche neben dem Verfahren nach Blaine dar.

3.1.4 Chemische Zusammensetzung

Die **chemische Zusammensetzung** der im Rahmen dieser Dissertation verwendeten Bindemittel stammt zum Teil von den jeweiligen Herstellern oder wurde durch die Firma terrachem mittels Röntgenfluoreszenzanalyse nach DIN 51001 ermittelt.

3.1.5 Qualitative Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalyse

Die **Röntgenbeugungsanalyse** diente zur qualitativen Phasenbestimmung der verwendeten Bindemittel. Die zu untersuchenden Materialien wurden hierzu auf eine Korngröße $< 40 \mu\text{m}$ zerkleinert und die Messung mit einem Siemens Pulverdiffrakto-

meter, Typ Kristalloflex D 500 mit Cu $K_{\alpha 1,2}$ -Röntgenstrahlung, PC-Steuerung und Socabim-Software durchgeführt. Die Generatorspannung betrug 40 kV, der Röhrenstrom 30 mA. Die Pulverstreichpräparate wurden im Winkelbereich von 3 bis 65 Grad- 2Θ gemessen und anschließend ausgewertet. Die Goniometergeschwindigkeit betrug 1,2 °/min.

3.2 Frischmörteluntersuchungen

3.2.1 Ausbreitmaß

Die Konsistenz der Frischmörtel wurde mit **Ausbreitmaß** nach DIN 18555 Teil 2 mit dem Ausbreittisch beurteilt. Aus der Menge des benötigten Wassers zum Einstellen der je nach Anwendung erforderlichen Konsistenz ergibt sich der Wasseranspruch (WA) bezogen auf den Bindemittelgehalt.

3.2.2 Wasserrückhaltevermögen

Die Ermittlung des **Wasserrückhaltevermögens WRV** erfolgte nach DIN 18555 Teil 7.

3.2.3 Fließverhalten

Die Viskosität der Hinterfüllmörtel wurde indirekt über die Bestimmung des **Fließverhaltens** in Anlehnung an DIN 53211 mit dem DIN-Becher bestimmt. Hier wird die Auslaufzeit einer festgelegten Flüssigkeitsmenge (100 ml) durch eine definierte Düse gemessen. Abweichend von der DIN 53211 wurde eine Düse mit einem Düsendurchmesser von 1,0 mm verwendet.

In Vorversuchen fand ein von KNÖFEL 1993 genanntes Verfahren⁷⁸ Anwendung. Die Ergebnisse ergaben jedoch keine vergleichbaren Werte zum DIN-Becher. Die Apparatur in diesem Verfahren muß jedoch selbst gebaut werden, was zu unterschiedlichen Ergebnissen verschiedener Labore führen kann. Aus Gründen der besseren Nachvollziehbarkeit wurde dem genormten Verfahren in späteren Versuchen der Vorzug gegeben.

3.2.4 Penetrationsverhalten

Bei der Prüfung des **Penetrationsverhaltens** wird das Eindringen des zu prüfenden Mörtels in ein definiert hergestelltes Sandbett in einem Reagenzglas getestet. Das Pe-

⁷⁸ KNÖFEL 1993: S. 157, Abschnitt 4.4.1.4 Fließverhalten

netrationsverhalten stellt die wichtigste Frischmörteleigenschaft der Hinterfüllmörtel dar, da Hohlräume in Putzen bzw. zwischen Putz und Putzuntergrund sicher verfüllt werden sollen. Diese Prüfung wurde in Anlehnung an das von KNÖFEL 1993⁷⁹ angegebene Verfahren durchgeführt.

Um die Reproduzierbarkeit des Verfahrens zu verbessern, kam für die Herstellung des Sandbettes nur Normsand der Kornfraktion 1-2 mm zur Anwendung. Zudem mußte dieses aufgelockert werden, da eine Verdichtung des Sandes durch Erschütterungen zu einer Beeinträchtigung der Wiederholbarkeit der Ergebnisse führte. Die Auflockerung geschieht durch Hin- und Herkippen des mit Sand gefüllten Reagenzglas. Dieses Kippen soll viermal durchgeführt und nach Drehung des Reagenzglas um 90° wiederholt werden. Die Füllhöhe des Reagenzglas muß nach der Auflockerung auf 12 cm abgeglichen werden. Anschließend ist das Sandbett erneut zu lockern.

Das so vorbereitete Sandbett wird nun mit dem zu prüfenden Hinterfüllmörtel mit 2 cm Überstand gefüllt. Dieser Überstand ist konstant zu halten, während der Mörtel mehr oder weniger langsam in das Sandbett eindringt. Erschütterungen und Bewegungen des Reagenzglas sind während dieser Zeit unbedingt zu vermeiden, da sie zu Fehlbestimmungen führen können.

Die Penetrationstiefe wird nach 15 min, 30 min, 1 h und 2 h auf 1 mm genau bestimmt.

Zur besseren Differenzierung der Eignung der Hinterfüllmörtel fand die Versuchsdurchführung ausschließlich unter Verwendung von Reagenzgläsern statt. Dabei strömt die im Sandbett befindliche Luft dem eindringenden Mörtel entgegen und erschwert die Penetration. Bei schlecht penetrierenden Systemen kann, wie von KNÖFEL 1993 angegeben, die Verwendung von U-Röhrchen sinnvoll sein, da hier die Luft im Sandbett nicht dem Hinterfüllmörtel entgegenströmt und so das Eindringen des Mörtels erleichtert.

3.2.5 Sedimentationsverhalten

Das **Sedimentationsverhalten** der Hinterfüllmörtel wurde nach dem von Knöfel 1993⁸⁰ angegebenen Verfahren bestimmt.

3.2.6 Frischmörtelrohddichte

Die **Frischmörtelrohddichte** r_f der Mörtel wurde nach DIN 18555 Teil 2 ermittelt.

⁷⁹ KNÖFEL 1993: S. 155 - 156, Abschnitt 4.4.1.2 Penetration in mit Sand gefüllte Gläser

⁸⁰ KNÖFEL 1993: S. 155

3.3 Festmörteluntersuchungen

3.3.1 Mechanische Eigenschaften und Frost-Tauwechsel-Widerstand

3.3.1.1 Elastizitätsmodul

Die Elastizitätsmoduln der Mörtelprüfkörper wurden als **dynamischer E-Modul E_{dyn}** mittels Resonanzfrequenzverfahren nach KOTTAS 1964 und KNÖFEL 1993⁸¹ bestimmt. Als Meßgerät diente ein DIGI EG-2 der Fa. Labek.

3.3.1.2 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der **Biegezugfestigkeit f_{BZ}** erfolgte nach DIN 18555 Teil 3 an Prismen der Abmessungen 4x4x16 cm oder 2x4x16 cm. In Vorversuchen sind Prismen der Abmessungen 1,5x1,5x6 cm verwendet worden.

Die Messungen wurden mit einer Prüfpresse der Fa. RK Toni Technik, Typ Toni Comp III, durchgeführt.

3.3.1.3 Druckfestigkeit

Die Ermittlung der **Druckfestigkeit f_{D}** erfolgte gemäß DIN 18555 Teil 3 bzw. bei Kalkmörteln nach DIN EN 459-2 an den aus der Prüfung der Biegezugfestigkeit erhaltenen Prismenhälften.

Bei der Bestimmung der Druckfestigkeit an Proben historischer Putze kam das von KNÖFEL 1993 genannte Verfahren⁸² zur Anwendung. Dabei fanden runde Druckstempel mit einem Durchmesser von 20 mm Verwendung. Die Vergleichbarkeit mit an Normprismen bestimmten Druckfestigkeiten ist nach KNÖFEL 1993 gegeben. Danach ist die ermittelte Festigkeit bei einer Prüfkörperdicke von 10-20 mm mit einem Korrekturfaktor k zu multiplizieren, um vergleichbare Ergebnisse zu den Druckfestigkeiten zu erhalten, die an Prismen nach DIN 18555 ermittelt wurden. Der Korrekturfaktor wird zur Zeit mit $k=1$ angegeben.

3.3.1.4 Haftzugfestigkeit

Die **Haftzugfestigkeit f_{HZ}** wurde nach DIN 18555 Teil 6 ermittelt. Die Prüfflächen wurden mit einem Kernbohrer (Innendurchmesser von 50 mm) angebohrt, der Abstand vom Rand betrug ca. 50 mm. Die Bohrtiefe in den Putzuntergrund betrug ein-

⁸¹ KNÖFEL 1993: S. 91 - 94, Abschnitt 1.3.2.2.1 A4M-Dynamischer E-Modul

⁸² KNÖFEL 1993: S. 113 - 115, Abschnitt 2.3.2.3 A11P-Druckfestigkeit des Putzes am Putzgrund

heitlich zwischen 8 bis 10 mm, um definierte Bedingungen für die Haftzugfestigkeitsprüfung herzustellen. Nach SCHULZ 1984 werden Prüfstreuungen durch diese Probenvorbereitung reduziert. Die Bohrstelle wurde gereinigt, und anschließend die Prüfstempel mit einem PMMA-Kleber auf die trockenen Verbundkörper geklebt. 24 Stunden später wurden die Haftzugfestigkeiten bestimmt.

Zur Prüfung diente ein Haftzugprüfgerät der Fa. Herion, Typ HP 850, Klasse 1 nach DIN 51220.

3.3.1.5 Zugfestigkeit

Die Bestimmung der **Zugfestigkeit β_z** erfolgte nach Knöfel 1993⁸³. Die Prüfung wurde mit einer Zugzange, Typ RWTH ibac durchgeführt, die in ein Zugfestigkeitsprüfgerät der Fa. Zwick eingebaut wurde.

Zusätzlich fand die Ermittlung der Zugfestigkeit wie folgt statt. Mörtelscheiben mit einem Durchmesser von 50 mm und 1,5 cm Probepdicke wurden auf eine Metallplatte geklebt und die Zugfestigkeit durch Abreißen eines auf der Oberfläche der Mörtelscheibe angebrachten Prüfstempels ermittelt. Als Prüfgerät diente ein Haftzugprüfgerät der Fa. Herion, siehe Kapitel 3.3.1.4. Die Steigerung der Prüfkraft erfolgte angepaßt an die Abreißfestigkeit der Putzmörtel.

3.3.1.6 Frost-Tauwechsel-Widerstand

Durch die Prüfung des **Frost-Tauwechsel-Widerstandes (FTW)** soll der Widerstand der zu untersuchenden Festmörtel gegen Frost-Tauwechsel beurteilt werden. Innerhalb dieser Arbeit fand das Verfahren nach Knöfel 1993⁸⁴ Anwendung.

3.3.2 Hygrische Eigenschaften

3.3.2.1 Schwinden in der Form

Die Ermittlung der Längenänderung beim Übergang vom Frischmörtel zum Festmörtel durch Wasserabgabe und/oder Hydratationsvorgänge (siehe auch Seite 15) fand nach folgendem Verfahren statt. In Ermangelung einfacher und zuverlässiger Methoden zur Erfassung des Schrumpfens beim Übergang vom Frisch- zum Trockenmörtel wurde die Innenweite jedes einzelnen Faches der verwendeten Normprismenformen vor dem Einformen der Mörtel mit einer elektronischen Schieblehre durch Mehrfach-

⁸³ KNÖFEL 1993: S. 115 - 116, Abschnitt 2.3.3.4 A13P-Zugfestigkeit β_z ; aus der zugehörigen Spannungs(σ_z)-Dehnungs(ϵ)-Linie kann der Zug-E-Modul bestimmt werden

⁸⁴ KNÖFEL 1993: S. 96 - 97, Abschnitt 1.3.2.2.4 A7M-Widerstand gegen Frost-Tauwechsel (FTW)

bestimmung auf 1/100 mm genau vermessen. Nach dem Ausformen der erhärteten Mörtel⁸⁵ wurde die Länge der Mörtelprismen an den Stirnflächen ebenfalls auf 1/100 mm exakt bestimmt. Danach ergibt sich das „Schwinden in der Form“ ϵ_{sF} als die auf die Formenlänge bezogene Längenänderung in mm/m⁸⁶. Das Schwinden in der Form ist ein Teil des 1. Schwindens und wird in dieser Arbeit getrennt angegeben. Grund ist die bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Autoren, die das Schwinden in der Form nicht bestimmten.

$$\epsilon_{sF} = \frac{(L_1 - L_2) \cdot 1000}{L_1} \quad (23)$$

ϵ_{sF} = Schwinden in der Form in mm/m

L_1 = Länge eines leeren Formenfaches in mm

L_2 = Länge des zugehörigen Prismas nach dem Ausformen in mm

3.3.2.2 Hygrische Dehnung

Die hygrischen Dehnungen der verschiedenen Mörtel wurden nach dem Verfahren von KNÖFEL 1993⁸⁷ ermittelt. Die Angabe der Dehnungen erfolgt in mm/m.

Dabei wird als **1. Schwinden** ϵ_{s1} die Dehnung der Prüfkörper, bedingt durch Fröhschwinden, chemische Reaktionen (Hydratation und Carbonatisierung) und Wasserabgabe, verstanden.

Als **Quellen** ϵ_q wird die bezogene Längenänderung bei Einlagerung in Wasser von 20 °C und als **2. Schwinden** ϵ_2 die Dehnung nach Weiterlagerung des gewässerten Prüfkörpers im Normalklima DIN 50014-20/65-1⁸⁸ verstanden.

Abweichend von dieser Vorschrift konnten die Proben für das 2. Schwinden nur im Normalklima DIN 50014-23/50-2 gelagert werden. Die Längenänderungen wurden mit einem BAM-Setzdehnungsmesser der Fa. Staeger, Bauart Pfender, auf 1/1000 mm genau gemessen.

3.3.2.3 Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ -Wert) wurde nach DIN 52615 bestimmt. Die Randbedingungen sind 23-50/95 (Naßbereichsverfahren).

⁸⁵ Der Zeitpunkt des Ausformens ist stark abhängig vom Bindemittel. So können zementgebundene Mörtel i. d. R. nach 24 h, Gipsmörtel früher und Kalkmörtel nach 7 d ausgeformt werden

⁸⁶ Als Mittel des Schwindens der Ober- und Unterseite der Prismen. Da es wegen ungleichmäßiger Austrocknung (bevorzugt trocken die Prismenoberflächen in der Form) zur Verkrümmung der Prismen kommen kann.

⁸⁷ KNÖFEL 1993: S. 95 - 96, Abschnitt 1.3.2.2.3 A6M-Feuchtedehnung (ϵ_h) - Schwinden (ϵ_s) - Quellen (ϵ_q)

⁸⁸ Normalklima DIN 50014-20/65-2 ist als Klima mit den folgenden Bedingungen definiert: 20 °C \pm 2 °C und einer rel. Luftfeuchte von 65 % \pm 5 %.

3.3.2.4 Sorptionsverhalten

Bei der Bestimmung des Sorptionsverhaltens wurden einerseits **Sorptionsfeuchten** für 53 % (u_{m53}) und 80 % (u_{m80}) rel. Luftfeuchte, andererseits die **Sorptionsisothermen** (u_v) der verschiedenen Mörtel zusammen mit den Dehnungen (**Sorptionsdehnung** e_u) der Proben aufgenommen.

Die Bestimmung der Sorptionsfeuchte erfolgte nach DIN 52620. Die Feuchten wurden in Exsikkatoren über gesättigten Salzlösungen, $(NH_4)_2SO_4$ -Lösung für 80 % rel. Luftfeuchte und $Mg(NO_3)_2$ -Lösung für 53 % rel. Luftfeuchte, bei 23 °C erzielt.

Die Prüfkörper wurden vor Beginn der Bestimmung bis zur Gleichgewichtsfeuchte bei 70 °C getrocknet und anschließend im Exsikkator über Silicagel abgekühlt. Dieser Wert wurde als Wert für 0 % rel. Luftfeuchte für die Bestimmung der Sorptionsfeuchten und Sorptionsisothermen sowie für die Ausgangslänge der Sorptionsdehnungen angenommen.

Die Sorptionsisothermen und Sorptionsdehnungen wurden bei 20 °C und den folgenden rel. Luftfeuchten bestimmt: 14 %, 48 %, 56 %, 67 %, 77 %, 87 % und 95 % rel. Luftfeuchte. Die Durchführung fand z. T. in Exsikkatoren über gesättigten Salzlösungen (LiCl-Lösung für 12 % rel. Luftfeuchte und Na_2HPO_4 -Lösung für 95 % rel. Luftfeuchte), z. T. in einem Klimaschrank der Fa. Noske-Kaeser, Typ Realtest - Klimaprüfschrank KSP 251/40 H, statt. Die Messung der Dehnungen erfolgte mit einem BAM-Setzdehnungsmesser.

3.3.2.5 Innere Oberfläche nach BET

Die **innere Oberfläche** (O_i) der Mörtel läßt sich nach der BET-Theorie aus der Gleichgewichtsfeuchte bei 53 % rel. Luftfeuchte bei einer Lagerungstemperatur von 23 °C ermitteln. Dabei ist:

$$O_i = O_o \cdot u_m(j^*) \cdot (1 - j^*)^{89} \quad (24)$$

O_i = innere Oberfläche in m^2/g

O_o = Fläche, welche 1g Wasser in monomolekularer Schicht bedecken kann ($O_o = 3850 m^2/g$)

φ^* = eine beliebige rel. Luftfeuchte zwischen 0 und 0,75

$u_m(\varphi^*)$ = massebezogene Gleichgewichtsfeuchte des Baustoffs für die rel. Luftfeuchte φ^*

⁸⁹ Aus KLOPFER 1994: S. 292

3.3.2.6 Wasseraufnahme

Bei der Bestimmung der Wasseraufnahme konnten der **Wasseraufnahmekoeffizient (w)**, der **Wasseraufnahmegrad nach 24 h (w_{m24})** sowie der **absolute Wasseraufnahmegrad (w_m)** ermittelt werden. Dabei wurde die Prüfung des Wasseraufnahmekoeffizienten in Anlehnung an DIN 52617 und die des Wasseraufnahmegrades in Anlehnung an DIN 52103 an Normprismen bzw. an Bohrkernen mit dem Durchmesser von 30 mm (historische Mörtel) durchgeführt.

Als absoluter Wasseraufnahmegrad ist im Rahmen dieser Arbeit der Wassergehalt einer Probe definiert, die, nach anfänglichem kapillaren Saugen über mindestens 24 h, im Vakuum bei 50 hPa lagerte.

Bei einigen Mörteln wurde der absolute Wasseraufnahmegrad als absoluter Wasseraufnahmegrad nach DIN 52103 nach Unterwasserlagerung bis zur Massekonstanz ermittelt. Diese differierende Vorgehensweise wird bei den Proben entsprechend gekennzeichnet. Vergleichsmessungen ergaben kleinere Differenzen, lediglich bei Proben, die erhebliche Gehalte an Luftporen aufwiesen, traten deutliche Differenzen zwischen beiden Verfahren auf. Stets wiesen die im Vakuum gelagerten Proben höhere Wasseraufnahmegrade auf (siehe hierzu Tabelle A6 im Anhang). Der Vorteil der Bestimmung des Wasseraufnahmegrades im Vakuum liegt im Zeitgewinn. Der Versuch ist nach 48 h abgeschlossen, während der Wasseraufnahmegrad nach DIN 52103 unter Luftdruck leicht bis zu vier Wochen dauern kann. Die Versuche wurden in einem Klimaraum mit dem Normalklima DIN 50014-23/50-2 durchgeführt.

3.3.2.7 Wasserabgabe

Das Wasserabgabeverhalten der verschiedenen Mörtel und z. T. auch der historischen Putzmörtel wurde in Anlehnung an KNÖFEL 1993⁹⁰ ermittelt. Der Austrocknungsvorgang ergibt die Knickpunktkurve nach Krischer, siehe Bild 9.

Dabei werden 3 Trocknungsperioden unterschieden, die durch mehr oder weniger ausgeprägte Knicke getrennt sind:

- In der **1. Trocknungsperiode** ist die Massenstromdichte des verdunstenden Wassers etwa gleichbleibend, solange der Probekörper an der Oberfläche relativ feucht ist und mehr Feuchte aus dem Innern an die Oberfläche gelangt, als verdunsten kann. In dieser Periode herrscht nach KLOPFER 1994b an der Körperoberfläche 100 % relative Luftfeuchte. Wenn der kapillare Feuchtetransport nicht mehr ausreicht, um diese Massenstromdichte aufrechtzuerhalten, fällt die Verdunstungsgeschwindigkeit plötzlich ab, der **1. Knickpunkt** ist erreicht.

⁹⁰ KNÖFEL 1993: S. 117 - 119, Abschnitt 2.3.3.1 B10P-Austrocknungsverhalten

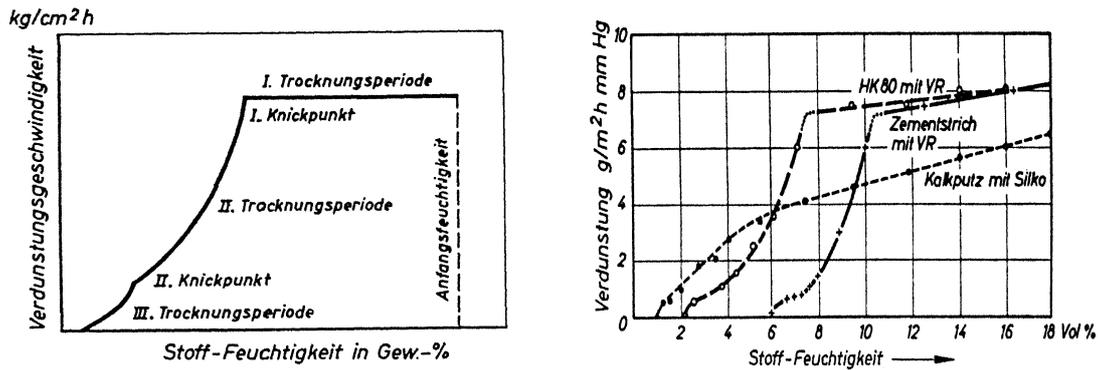


Bild 9: Knickpunktkurven nach Krischer - im linken Bild ist das Schema des Verdunstungsvorgangs, im rechten Bild der Austrocknungsvorgang bei verschiedenen Mörteln dargestellt (CAMMERER 1960)

- In der **2. Trocknungsperiode** gehen der Wassergehalt und die rel. Luftfeuchtigkeit über der Probe stark zurück. Nur noch in den tieferen Schichten des Probekörpers ist genügend Feuchtigkeit vorhanden, um dort in den Poren den Sättigungsdruck des Wassers aufrechtzuerhalten. Die Trocknung ist geprägt von den Diffusions- und Kapillareigenschaften des Stoffes. Der **2. Knickpunkt** tritt dann ein, wenn nur noch die Dampfdiffusion für die Austrocknung verantwortlich ist.
- In der **3. Trocknungsperiode** erfolgt die Austrocknung nur noch über die Dampfdiffusion.

Abweichend von KNÖFEL 1993 fand im Anschluß an die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme (Wasseraufnahmekoeffizient), die der Wasserabgabe vorausgeht, eine zusätzliche Lagerung der Proben im Wasser über 24 h bei 50 hPa statt. Durch diese Vorgehensweise besteht nach eigenen Untersuchungen am ehesten die Möglichkeit auch die 1. Trocknungsperiode nach Krischer zu ermitteln.

Trotzdem traten Schwierigkeiten auf, die 1. Trocknungsperiode zu erfassen, sowie den Übergang zur 3. Trocknungsperiode zu erkennen (vergl. Bild 9). Aus diesem Grunde wurde das Trocknungsverhalten nach dem von KLOPFER 1994a angegebenen Verfahren ausgewertet.

Dabei wird die Auswertung nicht auf die Krischer'sche Knickpunktkurve, sondern auf die Darstellung des volumen- bzw. flächenbezogenen Wassergehaltes gegen die Zeit bezogen.

Die von KLOPFER 1994a gewählte Darstellung ermöglicht nicht die Erfassung der 1. Trocknungsperiode nach Krischer. Bild 10 veranschaulicht diesen Sachverhalt an eigenen Messungen. Dort ist die Wasserabgabe von rotem Mainsandstein nach beiden Verfahren dargestellt. Der von Klopfer als 1. Trocknungsabschnitt bezeichnete Trocknungszeitraum erfaßt die 1. und 2. Trocknungsperiode nach Krischer. Der 2. Knickpunkt der Knickpunktkurve nach Krischer liefert ein mit dem Wendepunkt der

Auswertung nach KLOPFER 1994a übereinstimmendes Ergebnis. Dieser Übergang zur ausschließlichen Trocknung über Dampfdiffusion ist in der von Klopfer gewählten Darstellung deutlicher erkennbar.

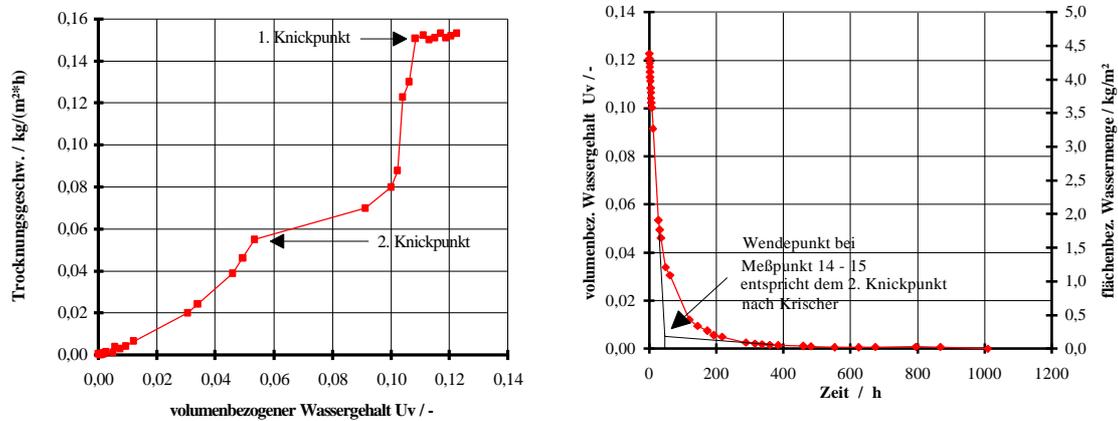


Bild 10: Gegenüberstellung der Auswertung des Austrocknungsverhalten eines roten Mainsandsteins nach Krischer (Knickpunktkurve links) und nach Klopfer (rechts)

Nachfolgend sind die Kennwerte aufgeführt, die als Ergebnis der Wasserabgabe angegeben werden. Sie wurden z. T. erstmals von KLOPFER 1994a angegeben:

- flächenbezogene Wassermenge der Probe zu Beginn der Austrocknung (w_0)
- die Stoffeuchte zum Zeitpunkt des Übergangs zum 2. Trocknungsabschnitt nach KLOPFER 1994a (Stoffeuchte und Zeitpunkt am 1. Knickpunkt (w_{knick1} , t_{knick1}))
- das Verhältnis der im 1. Trocknungsabschnitt nach Klopfer austrocknenden Wassermenge zum Wassergehalt bei Versuchsbeginn (w_{kn})
- die Verdunstungsmassenstromdichte des 1. Trocknungsabschnittes nach Klopfer (Wasserabgabekoeffizient Trocknungsabschnitt 1 (\dot{m}_{knick1}))
- der Wasserabgabegrad nach 24 Stunden (w_{ab24}) und bis zur Gleichgewichtsfeuchte (w_{ab}) (BÖTTGER 1993c)
- der Wasserabgabekoeffizient (w_{ak}), der die Verdunstungsmassenstromdichte in den ersten 24 Stunden wiedergibt (BÖTTGER 1993c).

Die Massenstromdichte unter Versuchsbedingungen ergibt sich als:

$$\dot{m} = \frac{w_0 - w_{\text{knick}}}{t_{\text{knick}}} \quad (25)$$

- w_0 = flächenbezogene Wassermenge der Probe zu Beginn der Austrocknung
- w_{knick} = Stoffeuchte am Knickpunkt
- t_{knick} = Zeitpunkt des Übergangs von einem zum anderen Trocknungsabschnitt

Die Untersuchung des Austrocknungsverhaltens fand in einem Klimaraum mit dem Normalklima DIN 50014-23/50-2 statt.

3.3.3 Ausblühverhalten

Die Prüfung des Ausblühverhaltens fand in Anlehnung an KNÖFEL 1993⁹¹ statt. Abweichend von dieser Vorschrift war die Lagerung im Normalklima DIN 50014-23/50-2. Mit dieser Prüfung können wasserlösliche, zu Ausblühungen führende Salze in den Mörteln sicher erkannt werden.

3.3.4 Sulfatwiderstand

Der hohe Sulfatwiderstand vieler verwendeter Bindemittel, so z. B. des HGZ oder des HOZ mit Kalksteinmehlzusatz, nach dem Verfahren HENKEL 1994, stand schon vor Beginn der Untersuchungen fest. Ergänzend wurde der Sulfatwiderstand im Rahmen dieser Dissertation nach weiteren Verfahren ermittelt.

Einerseits kam das Verfahren nach Koch/Steinegger (KOCH 1960) zum Einsatz, andererseits eine davon abgewandelte Prüfung, in der statt Na_2SO_4 -Lösung gesättigte CaSO_4 -Lösung eingesetzt wurde. Die Probenvorbereitung und Lagerungsdauer sowie die Titration mit 2 n H_2SO_4 gegen Phenolphthalein zur Ergänzung verbrauchter Sulfationen war bei beiden Verfahren gleich.

3.3.5 Quecksilber-Druckporosimetrie

Die Ermittlung der Gesamtporosität und der Porenradienverteilung in erhärteten Mörteln fand mittels Hg-Druckporosimetrie statt. Zum Einsatz kam ein Meßgerät der Fa. micromeretics, Typ Autopore 9220, mit Steuer- und Auswertungssoftware. Die Proben wurden wie folgt vorbereitet. Die Probezerkleinerung auf eine Korngröße von 2-4 mm erfolgte mittels einer Kneifzange. Dem schloß sich eine mindestens 7 Tage dauernde Trocknung der Proben im Trockenschrank bei 70 °C bis zur Gleichgewichtsfeuchte an.

Das Hg-Druckporosimeter evakuierte die Proben bis auf ein anzugebendes Vakuum, welches hier 0,067 hPa⁹² betrug. Es blieb für einen anzugebenden Zeitraum angelegt,

⁹¹ KNÖFEL 1993: S. 104 - 105, Abschnitt 1.3.3.2.3 B6M Ausblühverfahren

⁹² Dieses Vakuum wird vom Gerät als 50 µm Hg-Säule angegeben

hier 15 Minuten. Anschließend wurden die Proben im Probebehälter bei einem Fülldruck von 34 hPa mit Quecksilber überschichtet.

Während der Messung erhöhte das Gerät den Druck über den Proben (Quecksilberintrusion) nach einer angegebenen Drucktabelle. Jeder angegebene Druckpunkt wurde 30 Sekunden konstant gehalten.

Die Berechnung der Ergebnisse erfolgte automatisch mit der Gerätesoftware für gegebene Oberflächenspannung und Randwinkel des Quecksilbers. Nach WASHBURN 1921 ergibt sich folgende Beziehung zwischen dem Porenradius und dem aufgewendeten Druck:

$$r = \frac{-2 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta}{p} \quad (26)$$

r = Porenradius in μm

σ = Oberflächenspannung in N/m ; hier 0,485 N/m

Θ = Randwinkel in $^\circ$; hier 141,3 $^\circ$

p = Druck in MPa

Die Kompressibilität des Quecksilbers, die Volumenänderung des Meßgefäßes und die Temperatursteigerung während der Messung wurden rechnerisch durch die mitgelieferte Software berücksichtigt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte graphisch als logarithmische Porenradienverteilung sowie tabellarisch (Rohdichte, Reindichte, mittlerer Porenradius, Porenvolumina bei Grenzwerten z. B. nach ROMBERG 1978).

Zur besseren Unterscheidung der Porenradienverteilung sowohl der historischen Kalkmörtel als auch der Sandkalk- und wurde die meßbare Porosität in 6 Bereiche (BÖTTGER 1994) unterteilt:

Bereich 1 - Poren $> 50 \mu\text{m}$

Bereich 2 - Poren von $50 - 10 \mu\text{m}$

Bereich 3 - Poren von $10 - 1 \mu\text{m}$

Bereich 4 - Poren von $1 - 0,1 \mu\text{m}$

Bereich 5 - Poren von $0,1 - 0,01 \mu\text{m}$

Bereich 6 - Poren $< 0,01 \mu\text{m}$

Luftporen

Kapillarporen

Gelporen

Im Vergleich dazu ist die Einteilung der Poren für hydraulische Mörtel nach ROMBERG 1978 aufgeführt.

3.3.6 Wärmedehnungskoeffizient

Der Wärmedehnungskoeffizient α_T ist die Dehnung eines Prüfkörpers infolge Temperaturänderung. Er dient zur Beurteilung der Verformung durch Temperatureinfluß. Er wurde nach KNÖFEL 1993⁹³ bestimmt.

3.4 Chemisch-mineralogische Untersuchungen

3.4.1 Mörtelzusammensetzung nach Wisser/Knöfel

Die Untersuchung der historischen Putze erfolgte nach den von Wisser und Knöfel (WISSER 1987 und WISSER 1988) beschriebenen Verfahren. Andere Verfahren z. B. nach MICHAELIS 1896, BIEHL 1927, JEDRZEWSKA 1960, FRIZOT 1977, ALESSANDRINI 1985 oder LINDQVIST 1994 sind bekannt. Auf die Bestimmung des Proteingehaltes wurde verzichtet, da einige Putze Farbreste aufwiesen. Zudem führt eine Besiedlung der Putze mit Mikroorganismen, von der aufgrund des hohen Alters der Proben auszugehen ist, zu Fehlinterpretationen.

Die für diese Untersuchung geforderte Mörtelmenge von 100 g konnte nicht immer gewonnen werden, jedoch gelang dies in den meisten Fällen.

Im Rahmen dieses Verfahrens fallen folgende Daten zur Mörtelzusammensetzung an:

- Carbonatgehalt
- Gehalt an HCl-löslichem SiO_2
- Bindemittelgehalt
- Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis
- Korngrößenverteilung des Zuschlages.

3.4.2 Siebanalysen

Abweichend vom Mörteltrennungsgang nach Wisser und Knöfel (WISSER 1987 und WISSER 1988) erfolgte die Bestimmung der Sieblinien der Zuschläge nach DIN 4226 Teil 3 mit Normsieben folgender Maschenweiten: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm 4,0 mm und 8,0 mm. Aus den Daten der Siebanalysen konnte die Körnungsziffer (k' -Wert) der Zuschläge der historischen Putze ermittelt werden. Der k' -Wert ist die Summe aller Siebrückstände in M.-% geteilt durch 100.

3.4.3 Bestimmung des Gehaltes an wasserlöslichen Salzen

Die Ermittlung des Anteils wasserlöslicher Salze in den historischen Putzen erfolgte an wäßrigen Auszügen. Die Bestimmung der Gehalte der Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ und K^+ in historischen Putzen fand an den genannten Auszügen mittels der Atomab-

⁹³ KNÖFEL 1993: S. 94 - 95, Abschnitt 1.3.2.2.2 A5M-Wärmedenungskoeffizient (α_T)

sorptionsspektrometrie (AAS) mit einem Gerät der Fa. Perkin Elmer, Typ 1100B, statt.

Die Gehalte der Anionen SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- konnten mittels Ionenchromatographie (IC) der Fa. LDC Milton Roy, Typ CI-10 B, mit Technicol Säule erfaßt werden. Als Eluent diente Kaliumhydrogenphthalatlösung mit einem pH-Wert von 4,81.

Die Herstellung der wäßrigen Auszüge geschah wie folgt: Nach Zerkleinerung der zu untersuchenden Proben mittels Mörser auf $< 90 \mu\text{m}$ trockneten die Proben bei 40°C . Anschließend wurde 1 g der Substanz in 100 ml bidestilliertes Wasser gegeben und das Gemisch 1 h bei Raumtemperatur (20°C) geschüttelt. Nach Filtration der Lösung fand die Analyse mit AAS bzw. IC statt.

3.4.4 Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalyse

Die Röntgenbeugungsanalyse wurde verwendet, um die Gegenwart von Salzen in den historischen Putzproben sowie den mineralogischen Phasenbestand sowohl historischer Mörtel als auch hydratisierter Haft-, Hinterfüll- und Kalkputzen zu untersuchen. Die Probenvorbereitung und Messung erfolgte wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben. Die Nachweisgrenze liegt hier bei ca. 0,5-3 M.-%.

3.4.5 Mikroskopische Untersuchungen

Die mikroskopische Untersuchung der Putzmörtel mittels Durchlichtmikroskopie fand mit Hilfe eines Polarisationsmikroskopes der Fa. Leitz, Typ Ortholux, statt. Mit Hilfe der Durchlichtmikroskopie konnte neben der Röntgendiffraktometrie der mineralogische Phasenbestand in den Mörteln qualitativ bestimmt werden. Ergänzend zu den röntgenographischen Untersuchungen wurden hierdurch qualitative Zuordnungen nachgewiesener Minerale z. B. zu Zuschlag und zu Bindemittel möglich.

Mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) der Fa. Philips, Typ XL 30, mit angeschlossener energiedispersiver Röntgenanalytik (EDX) der Fa. EDAX, Typ PV 9800, mit fensterlosem Detektor wurden die Proben hinsichtlich ihrer Mikrostruktur untersucht.

3.4.6 Mengenmäßige Abschätzung mittels Vergleichsschaubildern

Die mengenmäßige Abschätzung des Kalkspatzen-Anteils der historischen Putzmörtel erfolgte mit einem Stereomikroskop der Fa. Wild Heerbrugg, Typ M7S bei 6facher

Vergrößerung. Mittels Vergleichsschaubildern von Terry und Chilingar (MÜLLER 1964) konnte der prozentuale Anteil einer Komponente in einem Gemenge abgeschätzt werden.

4 Untersuchung historischer Kalkputzmörtel

4.1 Beprobte Objekte

Die Kalkputze vier historischer Bauwerke aus dem 9.-13. Jahrhundert in verschiedenen Regionen der Bundesrepublik Deutschland wurden beprobt, um Kennwerte über deren chemisch-mineralogische Zusammensetzung, Mikrostruktur, technologische und hygrische Eigenschaften zu gewinnen. Anhand dieser Kennwerte sollte die Konzeptionierung von Restaurierungsmörteln erfolgen.

Die Probenahme konnte nicht überall im erforderlichen Maße durchgeführt werden. Ursache hierfür waren meist denkmalpflegerische Gründe.

Die Beprobung erfolgte stets im Bewußtsein, daß jede Probenahme selbst eine Zerstörung des Bestandes ist. Den Restauratoren und Denkmalpflegern, die an der Beprobung teilnahmen, sei an dieser Stelle Dank ausgesprochen, einerseits für die Betreuung während der Maßnahmen und andererseits für die kritischen Diskussionen um jede Probenahmestelle.

4.1.1 Torhalle in Lorsch



Bild 11: Torhalle in Lorsch

Anläßlich der Errichtung eines gemeinsamen europäischen Wirtschaftsraumes Anfang 1993 wurde wiederholt Karl der Große als historischer Vorgänger von Europa in Erinnerung gerufen. Träger der politischen und wirtschaftlichen Kraft dieses Reiches waren verschiedene Landstriche, zu denen auch das Rhein-Main-Gebiet gehörte. „Mainz als Bischofssitz, die Pfalzen Frankfurt, Ingelheim, Kostheim, die Klöster Lorsch, Michelstadt und Seligenstadt beispielsweise zeigen ein eng geknüpftes Netz von Verwaltungsstützpunkten der Karolinger“⁹⁴ in diesem Raum (JÜLICH 1993). „Die sicherlich bedeutendste karolingische Anlage am Mittelrhein

war das 764 gegründete und 772 zur Reichsabtei erhobene Benediktinerkloster Lorsch.“⁹⁴

⁹⁴ JÜLICH 1993: S. 7

Von der Benediktinerabtei sind nur noch Reste der karolingischen Basilika und die karolingische Torhalle mit gotischem Steildach erhalten. Ihre Entstehung ist nach SCHOLZ 1993 nach wie vor unklar. Manches deutet auf die Erbauung nach 830 hin. Die Torhalle war zum Zeitpunkt ihrer Entstehung kein sakrales Bauwerk. MERKEL 1993 diskutiert ihre Verwendung als Bibliothek und Skriptorium.

In der Torhalle in Lorsch sind nichtklerikale Fresken illusionierender Malerei mit figürlichen Darstellungen aus der karolingischen Zeit erhalten. Sie sind römischer Wandmalerei nachempfunden und stellen ein aus dieser Zeit einzigartiges kulturhistorisches Denkmal dar. Die Baugeschichte des ehemaligen Benediktinerklosters Lorsch wird im folgenden tabellarisch, nach SCHOLZ 1993 und LORSCH 1980, aufgeführt:

764	Gründung des Benediktinerklosters Lorsch durch Williswinth und ihren Sohn Graf Cancor.
767	Schenkung eines Gutes, um das Kloster für den hl. Nazarius zu bauen, von Thurinkbert, des Bruders des Grafen Cancor.
772	das Kloster Lorsch wird zur Reichsabtei erhoben
772/774	Bau der „Torhalle“ der Reichsabtei Lorsch
1.9.774	Weihe der Nazariusbasilika der Reichsabtei Lorsch in Gegenwart Karl des Großen und Erzbischof Lull von Mainz. Die Gebeine des hl. Nazarius werden übertragen.
876	Lorsch wird zur Grablege der deutschen Karolinger, die Beisetzung König Ludwigs des Deutschen erfolgt.
778-784	Verlegung eines Steinfußbodens und Anbringung einer Kassetten- decke aus Holz in der Nazariusbasilika, der Altar wird mit Gold und Silber geschmückt.
877-882	Bau der Ecclesia Varia als Grablege der Ostkarolinger
1090	Brand der Klosterkirche
1232	Lorsch kommt an Kurmainz, Verlust der Selbständigkeit, Zisterzi- ensermönche in Lorsch
1248	Prämonstratensermönche in Lorsch und Erneuerung der Kirche
1266	Wiederauffindung der Nazariusreliquie
1385	Königshalle wird Kapelle, dabei wird die Torhalle restauriert und der Dachstuhl erneuert.
1621	Zerstörung der Nazariusbasilika und der Ecclesia Varia durch spani- sche Truppen.
1890	Ausgrabungskampagne durch Rudolf Adamy
1927/28	Ausgrabungskampagne durch Friedrich Behn, Kloster, Kreuzwiese und Seehof.

Untersuchung historischer Kalkputzmörtel

1934/37	Ausgrabungskampagne durch Friedrich Behn, Wiederherstellung der Königshalle. Freilegung der karolingischen und gotischen Malereien.
1944	Informationen zu Bauteilen und Fragmenten werden beim Brand des Archivs des hessischen Landesmuseums vernichtet.
1955/58	umfangreiche Sicherungsarbeiten im Klosterbezirk
1964	1200tes Jubiläum aus Anlaß der Gründung des Klosters Lorsch
1970/72	Restaurierung der Wandmalereien in der Königshalle
1976	Restaurierung der Außenfassade der Königshalle
1983/84	Untersuchungen und Sicherungsarbeiten an der „Torhalle“
12./13.11.1991	interdisziplinäres Symposium über die geplante Restaurierung des Klosters Lorsch im hessischen Landesmuseum Darmstadt

Probenahme

In der Torhalle in Lorsch sind Putze verschiedener Bauperioden vorhanden. Im Rahmen der Restaurierung der Torhalle sollten möglichst umfassende Daten über Zusammensetzung und Eigenschaften der historischen Innenputze gewonnen werden. Diese sollten als Grundlage für die Neuentwicklung von Mörteln für die Restaurierung dienen. Drei Putze aus unterschiedlichen Bauperioden standen zur Beprobung an:

- karolingischer Putz
- gotischer Putz
- Ersatzputz aus den 30er Jahren dieses Jahrhunderts.

Bei der Entnahme der Proben wurde einerseits Wert darauf gelegt, vom historischem Material so wenig wie möglich zu entnehmen, andererseits aber so viel, daß aussagekräftige Untersuchungsergebnisse gewonnen werden konnten.

Folgende Proben wurden entnommen:

1. Bohrkerne (\emptyset 30 mm) nach vorheriger Kryo-Frostung (Verfahren Hangleiter⁹⁵), zur Prüfung des hygrischen Verhaltens
2. Proben zu 100 g Masse, zur Bestimmung der Mörtelzusammensetzung
3. Proben zu ca. 3-10 g Masse, zur Bestimmung der Salzgehalte und für Röntgenbeugungsuntersuchungen. Die Proben wurden in 2 Tiefen genommen (Zone 0-6 mm und 7-12 mm), um ein Tiefenprofil der Salzgehalte der Proben zu erhalten.

In Tabelle 7 ist die Herkunft der Putzproben getrennt nach Himmelsrichtung, Bauphase und Probenahmeart aufgelistet. Die genauen Bezeichnungen und Beschreibungen der Putzproben sind Tabelle A5 im Anhang zu entnehmen. Die Lage der Probenahmestellen in der Torhalle ist in den Bildern A1 bis A4 im Anhang dargestellt.

⁹⁵ Bei diesem Verfahren wird der Putz mit p-Xylol getränkt. Anschließend wird der Bereich mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Dabei erstarrt das p-Xylol. Dies führt zur Verdichtung und ermöglicht die Probenahme bei minderfesten Proben.

Tabelle 7: Herkunft und Anzahl der in der Torhalle in Lorsch entnommenen Proben

	Nord	Ost	West	Süd
Bohrkerne				
karolingische Putze	2	-	-	-
gotische Putze	3	-	3	3
Ergänzungsputze	4	4	3	5
Putzproben ca. 100 g				
karolingische Putze	-	3	-	-
gotische Putze	3	-	3	3
Ergänzungsputze	-	4	-	-
Kratzproben ca. 3 g je in 2 Tiefen				
karolingische Putze	-	-	-	-
gotische Putze	-	-	2	-
Ergänzungsputze	-	-	4	-

4.1.2 Einhardbasilika in Steinbach



Die Einhardbasilika in Steinbach bei Michelstadt ist nach ihrem Erbauer Einhard benannt, der wahrscheinlich 823 (THOMAS 1991) mit dem Bau der Basilika begann. Einhard hat die Baukunst zu seiner Zeit geprägt. Sein Name ist mit dem ehemaligen Reichskloster Lorsch und der ehemaligen Benediktinerabtei Seligenstadt verbunden.

den.

Die Basilika gilt als seltenes Dokument karolingischer Baukunst und wurde nach dem Vorbild römischer Kirchen erbaut. Die Bauarbeiten wurden 827 beendet. Die Bauge-

Untersuchung historischer Kalkputzmörtel

schichte der Einhardbasilika wird im folgenden tabellarisch, nach THOMAS 1991, aufgeführt:

ca. 823	Baubeginn der Einhardbasilika
827	Beendigung der Bauarbeiten
Ende 827	Zur Weihe der Basilika wurden die Gebeine der Märtyrer Marcellinius und Petrus in die Einhardbasilika gebracht.
840	Tod von Einhard, die Basilika wird für mehr als 200 Jahre zur Pfarrkirche.
1168	Das karolingische Dachwerk über dem Mittelschiff wird durch ein neues ersetzt. Vom karolingischen Dachstuhl sind heute noch die waagerechten Dachbalken und die Sparren erhalten.
1182	Der karolingische Vorbau im Westen wird abgebrochen und durch zwei Türme ersetzt. Die Türme stürzten teilweise gegen Ende des 16. Jahrhunderts ein, teilweise wurden sie abgetragen.
Anfang 13. Jahrhundert	Die Probstei Steinbach wird zum Benediktinerkloster. Zu dieser Zeit wurden die Arkaden im Mittelschiff vermauert und das südliche Seitenschiff in den Kreuzgang einbezogen.
1535	Das Kloster wird im Zuge der Reformation aufgehoben.
1542	Verkauf des Klosters an die Grafen von Erbach
Seit dem 16. Jahrhundert	war die Basilika ein Torso, erhalten waren nur das Mittelschiff mit den vermauerten Arkaden, der nördliche Nebenchor und der romanische Anbau des Winterchores. Die Seitenschiffe und der südliche Nebenchor fehlten wie der karolingische Westteil. Die romanischen Türme waren durch schlichte Türme ersetzt.
Mitte des 19. Jahrhunderts	Apsis und Ostgiebel des Mittelschiffs stürzen ein. Der Aufbau in ihrer ursprünglichen Gestalt erfolgte bald.
1967	Erwerb der Basilika durch das Land Hessen. Im Norden der Basilika erfolgten umfangreiche Grabungen, und die Basilika wird statisch gesichert. Die Mittelschiffwände wurden durch Rekonstruktion des Dachwerks der Seitenwände abgestützt. In den Hohlräumen im Mauerwerk verlegte man einen Betonanker, auf das Öffnen der Arkaden wurde verzichtet.

Probenahme

Die Probenahme in der Einhardbasilika beschränkte sich auf karolingische Mörtel, die sowohl mittels Bohrgerät als auch manuell entnommen wurden.

Die Probenahmestellen der gebohrten Probekörper sind dem Bild A5 im Anhang zu entnehmen, die der anderen Proben in den Bildern A5 und A6 im Anhang.

Die Gewinnung der Bohrkerne erwies sich als äußerst schwierig, da der Putz im zur Verfügung stehenden Bereich Schäden durch Rißbildung aufwies. Die meisten der Bohrkerne wiesen mehr oder weniger große Absprengungen auf.

Bei der manuellen Probenahme konnten ausreichend große Stücke präpariert werden, die auch die Bestimmung einiger technologischer Eigenschaften erlaubte. Es gelang, 6 Bohrkerne und 3 Putzproben aus der karolingischen Zeit zu nehmen.

Zusätzlich stellte die Verwaltung der Staatlichen Schlösser und Gärten in Hessen ein Putzstück aus dem Lapidarium zur Verfügung, welches aus vergleichbaren Bereichen der Einhardbasilika stammen soll.

4.1.3 Magdeburger Dom



Bild 13: Magdeburger Dom

Der Magdeburger Dom stellt ein bedeutendes Bauwerk dar, welches im Rahmen dieser Arbeit beprobt wurde. Seine Gründung geht auf König Otto I. zurück, der am Ort des heutigen Domes den Bau des ottonischen Domes im Jahre 955 veranlaßte. Bei einem Stadtbrand im Jahre 1207/08 brannte der ottonische Dom nieder.

Der Neubau des heutigen Domes begann 1209 und konnte 1520 fertiggestellt werden. Reste des ottonischen Domes sind innerhalb des Magdeburger Domes erhalten.

Um 1232 entstanden die Putzritzeien an der Westwand des Ostflügels des Kreuzganges mit figürlichen Putzritzungen König Ottos I. und seiner beiden Frauen sowie verschiedener Bischöfe. Diese Putzritzungen sind die einzigen dieser Art nördlich der

Alpen aus dieser Zeit und stellen ein einzigartiges kulturhistorisches Denkmal dar. Sie sind durch Putzschäden stark gefährdet, dabei liegt der Putz hohl und weist Gipsbildung durch SO₂-Immission auf.

Der baugeschichtliche Überblick kann nur stark gekürzt wiedergegeben werden und orientiert sich an HOFESTÄDT 1995.

937	Bau der ersten Klosterkirche
ab 955	Bau der späteren Domkirche (ottonischer Dom)
962	Erhebung des Klosters zu Magdeburg zum Erzbistum
968	Gründung des Erzbistums Magdeburg
1008	Weihe der Ost-Krypta
1207	Zerstörung des ottonischen Domes durch den Stadtbrand in Magdeburg
1209	Beginn des Neubaus unter Drehung der Achse und Ausrichtung auf das Grab Otto I.
1. Viertel 13. Jh.	Erste Arbeiten im Chor: Polygonsäulen, dann Chorerweiterung, gleichzeitig der Osttürme, Querhaus, 1. Joch Langhaus, Chorumgang
um 1232	Neugestaltung des Bischofsganges, Baubeginn der Seitenschiffe, repräsentativer Einbau von Spolien, Ostflügel, Kreuzgang mit Putzritzungen Ottos I., seiner beiden Frauen und Bischöfen
Mitte 13. Jh.	Fertigstellung des nochmals erhöhten Chores, Beginn des Baues der Westtürme
1274	Querhaus fertig gewölbt, Langhaus insgesamt unfertig
1306	Baubeginn des Mittelteils der Westfassade
frühes 14. Jh.	Einbau der Maßwerke in Chor und Querhaus, Portal und 2./3. Westturmgeschoß
1363	Weihe nach Vollendung des Langhauses, Remters und Nordflügel des Kreuzganges
1405	Redekinkapelle vollendet
1446	Erneuerung der Seitenschiffdächer
um 1450	Marienkapelle vollendet
ab 1477	Baufortsetzung an der Westfassade
1520	Vollendung der Westfassade und der Türme, von Bastian Binder
1546-1567	Dom bleibt geschlossen
10.5.1631	Tilly erobert Magdeburg und zerstört die Stadt, der Dom wird durch Beschuß am Südwest-Turm und am Dach beschädigt.

bis 1813	Allmählicher Verfall des Domes, während der „Franzosenzeit“ Nutzung als Schafstall.
1825	Schinkelsches Gutachten
1826-1834	Umfangreiche Instandsetzung des Domes mit Pirnaer Sandstein (u. a. Wasserspeier, Hoher Chor, Westfassade), Verlegung der Gedächtniskapelle in den Chor, Fenster werden farblos gestaltet.
1927-1930	Instandsetzung der West-Fassade, währenddessen wird von Wilhelm Kobis ein Katalog der Steinmetzzeichen erstellt.
1931	Dacharbeiten, Steinmetzarbeiten am Maßwerk des Nordwest-Turmes
ab 1932	Erste Schäden an den Putzritzungen durch Hinterspritzen behoben.
1933	Ausbesserungen am Hohen Chor
1934	Trockene Zerstörungserscheinungen im Bischofsgang
7.9.1939	Einleitung von Sicherungsmaßnahmen für die Jungfrauen
18.9.1944	Dach des südlichen Seitenschiffes durch Bomben zerstört, ebenso das Gewölbe, die Epitaphien, Fenster und Türen der Umgebung
16.1.1945	Schwere Bombentreffer
1943-1945	Insgesamt erhält der Dom im 2. Weltkrieg 7 Bombentreffer (2 Westfassade, je 1 in den Seitenschiffen (2. Joch), NW-Ecke des nördlichen Querhauses, südwestlicher Kreuzgang), die gesamte Verglasung geht verloren.
Nov. 1946	Steinmetzarbeiten am Maßwerk, Dachstuhlreparatur, Schieferarbeiten, Remter wieder gebrauchsfähig
Juli 1947	Der Hohe Chor ist noch immer ohne Dach.
August 1948	Fenster für den Hohen Chor, Nord-Seiten und Nord-Querschiff werden fertig wie das Gewände und Maßwerk. Erneuerung des Kreuzgewölbes, Behelfsdach für den Kreuzgang, Hoher Chor teilweise eingedeckt.
bis 1957	Instandsetzung: außen unter Beibehaltung der Schinkelschen Haltung, innen im Sinne des ursprünglichen Zustandes (farbige Fassung unklar), Bischofsgang auf originale Fußbodenhöhe gesenkt, die Grabkapelle wird an den alten Ort zurück verlegt.
1957	Dom ist wieder voll nutzbar.
1963	Steinmetzarbeiten am Süd-Turm nach Sturmschäden (Ringanker)
ab 1968	Instandsetzungen der Südseite, des Kreuzganges, des NW-Turmes
1980	Festigung der Putzritzungen unter Ergänzung von Flächen. Der Verbleib am Ort wird entschieden.

Probenahme

Die Probenahme an der Westwand des Ostflügels des Kreuzganges des Magdeburger Domes fand an untergeordneten Bereichen statt. In der Summe wurden 5 Proben aus dem 13. Jahrhundert, aus der Phase der Putzritzungen, 5 Proben aus späteren Bauphasen und 2 Putzproben eines Kalk/Zement-Putzes der letzten Restaurierungsphase gewonnen.

Eine zeichnerische Darstellung der heutigen Ansicht der Westwand ist in Bild A7 im Anhang dargestellt, die Probenahmestellen sind dem Bild A8 im Anhang zu entnehmen.

4.1.4 Ehemaliges Zisterzienserkloster Heydau



Bild 14: Ehemaliges Zisterzienserkloster Heydau bei Morschen

Das ehemalige Zisterzienserkloster Heydau wurde 1232 von Hermann von Treffurt als Sühne für seine Brandschatzung von Fritzlar gestiftet. Der Bau des Klosters wurde 1257 abgeschlossen. Die Gebäude erfuhren im Laufe der Geschichte drei Nutzungen. Zunächst die Nutzung als Nonnenkloster, später die Nutzung als Schloß und ab 1830 als Domäne.

Landgraf Moritz ließ das ehemalige Zisterzienserkloster in zwei Bauphasen in der Zeit von 1606-1608 und von 1616-1619 zum Schloß um-

bauen. Nach der Verwüstung im 30jährigen Krieg veranlaßte Landgraf Karl nach 1685 den Wiederaufbau, der 1695 abgeschlossen war.

Ab 1830 bis 1938 wurden die Gebäude als Domäne genutzt und seit 1940 als Wohngebäude für 28 Familien.

Vom letzten Wiederaufbau ab 1685 sind noch heute Kalkputze erhalten, deren Erhaltung angestrebt wird. Bei der letzten Restaurierung um die Jahrhundertwende erfolgte eine Erneuerung des Putzes. Dabei wurde alter Kalkputz mit Zementputz überputzt.

Die Folge dieser Maßnahme, welche die Putzregel ignorierte, nach der die E-Moduln der Baustoffe nach außen hin stetig abnehmen sollen, ist ein großflächiges Ablösen der Zementputze vom Untergrund.

Die Baugeschichte des ehemaligen Zisterzienserklosters ist im folgenden nach BELK 1996 tabellarisch aufgeführt:

1232	Stiftung der Nonnenniederlassung „zur Heide“ von Hermann von Treffurt als Sühne für die Brandschatzung von Fritzlar
um 1257	Bau der Klosterkirche
1319	Das Kloster wird überfallen und niedergebrannt. Der Wiederaufbau erfolgt sofort.
1335	Vermutliche Fertigstellung der Bauten; Papst Benedikt nimmt das Kloster unter seinen persönlichen Schutz.
1525	Zur Zeit der Bauernkriege plündern Bauern das Kloster.
1527	Als Folge der Reformation wird das Kloster aufgelöst. Landgraf Phillip richtet in Heydau ein Jagdschloß ein
1556	Im Kloster Heydau wird eine der ersten Dorfschulen Hessens eingerichtet.
1606-1608	Umbau des Burgvogtenhauses
1616-1619	Großer Umbau durch den Obristen Heinrich von Siegroth. Im 30jährigen Krieg (1618-1648) finden starke Zerstörungen statt.
1685	Landgraf Karl kauft die Schloßanlage für 20000 Taler, seine Frau finanziert den Wiederaufbau ab 1685.
1695	Bau der Orangerie
1696	Bau des neuen barocken Herrenhauses
1830	Nutzung als Domäne; Übergang von den hessischen Landgrafen in den Besitz des hessischen Staates
1938/39	Auflösung der Domäne
1940	Das Kloster geht vom Staat Hessen an die Gemeinde Altmorschen. Ausbau des Klosters zu Wohnungen für 28 Familien.
1977	Die Gemeinde Morschen verschenkt die Klostergebäude an den Staat Hessen. Die Neueindeckung des Daches erfolgt.

Probenahme

Die Probenahme war durch Vorgaben der Denkmalpflege eingeschränkt, so konnten lediglich 4 kleinere Kratzproben von Putzproben aus dem 17. Jahrhundert genommen werden, um deren Mörtelzusammensetzung zu untersuchen. Bekannt war zu diesem Zeitpunkt durch andere Untersuchungen eine hohe Belastung der Kalkputze durch Sulfat. Die Entnahme der Proben ist in Bild A9 im Anhang dokumentiert.

4.2 Untersuchungen der historischen Kalkputzmörtel

Die historischen Mörtel wurden verschiedenen Untersuchungen unterzogen:

Untersuchungsmethoden

- Qualitative Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalyse, siehe Kapitel 3.4.4, Seite 62
- Mikroskopische Untersuchungen, siehe Kapitel 3.4.5, Seite 62
- Mörtelzusammensetzung nach Wissler/Knöfel, siehe Kapitel 3.4.1, Seite 61
- Bestimmung des Gehaltes an wasserlöslichen Salzen, siehe Kapitel 3.4.3, Seite 61
- E-Modul, siehe Kapitel 3.3.1.1, Seite 52
- Druckfestigkeiten, siehe Kapitel 3.3.1.3, Seite 52
- Sorptionsfeuchten u_{m53} und u_{m80} , siehe Kapitel 3.3.2.4, Seite 55
- Wasseraufnahme, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56
- Wasseraufnahmekoeffizient, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56
- Wasserabgabe, siehe Kapitel 3.3.2.7, Seite 56
- μ -Wert, siehe Kapitel 3.3.2.3, Seite 54
- Hg-Druckporosimetrie, siehe Kapitel 3.3.5, Seite 59
- Bestimmung des Kalkspatzen-Anteils, siehe Kapitel 3.4.6, Seite 62

4.2.1 Qualitative Phasenbestimmung

Die qualitative Phasenbestimmung der historischen Putze der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika in Steinbach und des Magdeburger Domes mittels Röntgendiffraktometrie und Durchlichtmikroskopie ergab bei allen Putzmörteln und Objekten die Verwendung von Quarzsanden als Zuschlag. Carbonatischer Zuschlag wie Kalkstein oder Dolomit konnte nicht nachgewiesen werden. Bei dem Kalkputz PM3 des Magdeburger Domes aus dem 13. Jahrhundert gelang durchlichtmikroskopisch der Nachweis eines runden, vermutlich rein zufällig vorhandenen Gipskornes im Zuschlag.

Die Zuschläge enthalten mehr oder weniger hohe Gehalte an Feldspäten und Schichtsilikaten. Auffällig sind die unterschiedlichen Gehalte an Tonmineralen. Die Kalkputze der Torhalle in Lorsch und des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau weisen, im Gegensatz zu Putzen der Einhardbasilika und des Magdeburger Domes, erkennbare Tonmineralgehalte auf.

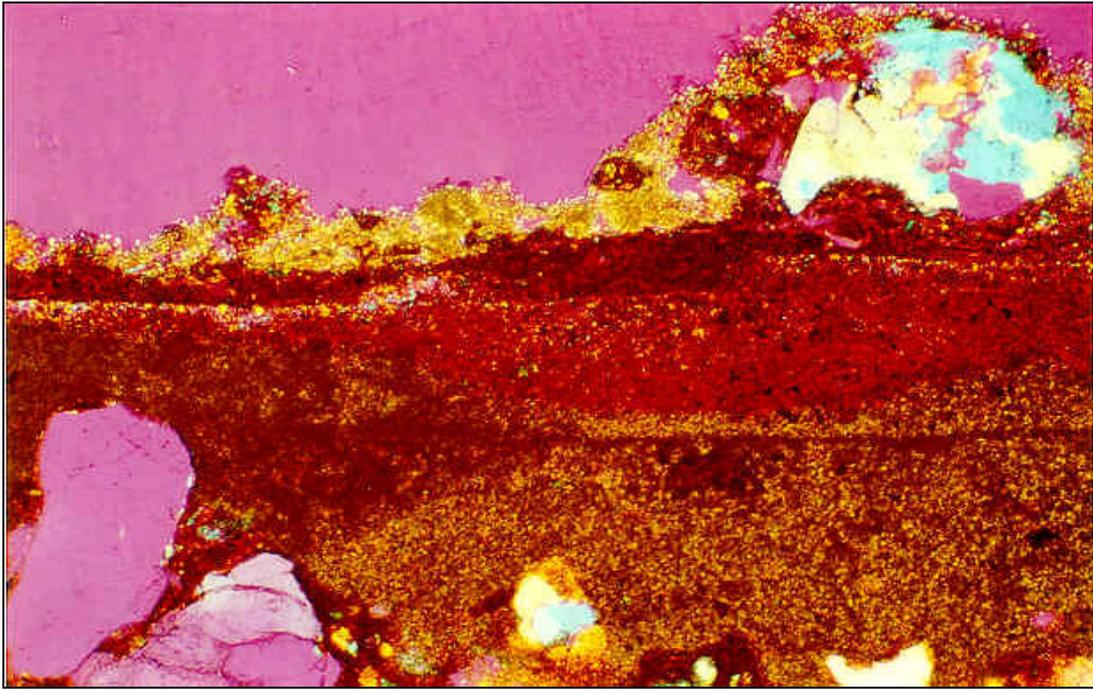
Bei den Innenputzen mit erhaltener Putzoberfläche sind bei ca. 40 % der Proben Tünchereste erkennbar. Diese Tünchen lassen meistens eine deutliche Vergipsung erkennen, siehe Bild 15, Probe PS6 - Einhardbasilika in Steinbach, 9. Jahrhundert. Auch die Oberflächen der Außenputze weisen Sulfatisierungen auf. Ein Beispiel hierfür stellt Bild 16, der Putzprobe PM3 - Magdeburger Dom, 13. Jahrhundert, dar. Im Gegensatz zu den Innenputzen ist bei den Außenputzen ein Eindringen des durch die Sulfatisierung gebildeten Gipses in tiefere Putzschichten erkennbar. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 17 von Probe PM3.

Im Gefüge der historischen Kalkputze waren makroskopisch helle, runde Kalkknöllchen und mikroskopisch farblich leicht abgesetzte, rundlich begrenzte Bereiche erkennbar, siehe Bild 18. Hierbei handelt es sich um Kalkkongregationen, die Kalkspatzen genannt werden. Sie bilden sich nach KRAUS 1989 beim Trockenlöschen des Kalkes und sind Folge der Herstellung von Kalkmörteln und Kalkputzen in früheren Zeiten. Das Aussehen der Kalkspatzen im Durchlichtmikroskop ist Bild 18, am Beispiel der Probe PL3 (Torhalle in Lorsch), zu entnehmen. In keinem Fall ließen sich in den Kalkspatzen Calcitreste als Folge von Schwachbrand erkennen.

Stereomikroskopisch ließ sich mit Vergleichsschaubildern der Kalkspatzen-Gehalt der Putze abschätzen, siehe Kapitel 3.4.6. Er lag im Mittel bei 3-5 M.-%. Putze aus diesem Jahrhundert enthielten keine Kalkspatzen.

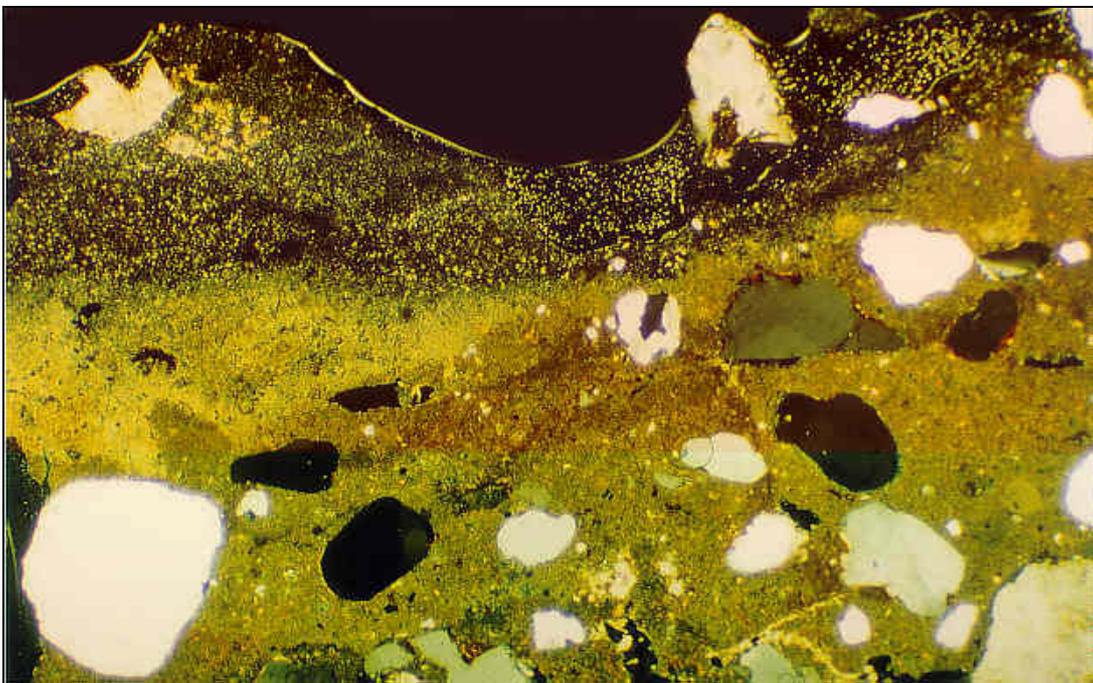
Die folgenden Besonderheiten fielen bei der qualitativen Phasenuntersuchung auf:

- Die Kalkputze aus der Torhalle in Lorsch weisen z. T. (karolingische und gotische Putze) gut nachweisbare Gehalte an Baryt auf. Eine Behandlung der Oberflächen mit Bariumhydroxidwasser in den 30er Jahren überführte Gips in Baryt und damit in eine wasserunlösliche Form.
- Auf der Oberfläche der Probe PM3 vom Magdeburger Dom kann ein bis zu 350 µm dicker durchscheinender Kunstharzanstrich nachgewiesen werden, siehe Bild 16. Diese Putzprobe wirkte bei mechanischer Belastung gummiähnlich.
- Bei der Mikroskopie der Probe PM3 sind Schlieren in der Bindemittelmatrix zu erkennen, die Hinweise auf eine Festigung mit Kieselsäureestern sein können. Diese Schlieren sind fotografisch nur undeutlich zu erkennen, weshalb auf eine fotografische Darstellung verzichtet wird.
- Die Putze des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau enthalten geringe Gehalte an Ziegelmehl und Schlacken.



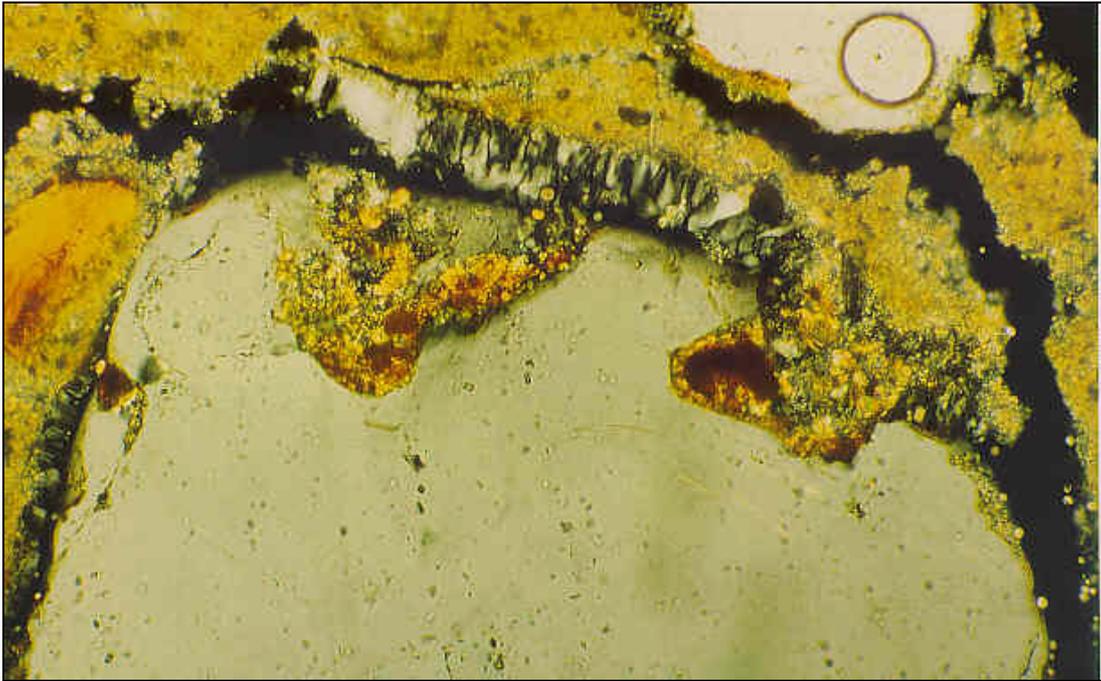
— 135 µm

Bild 15: Polarisationsmikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffes des Kalkputzes PS6 (Einhardbasilika) mit λ -Plättchen (Gipsplättchen) und gekreuzten Polarisatoren (XPL). Auf der Oberfläche des Kalkputzes ist die Tünche erhalten, die z. T. sulfatisiert (rote Bereiche). Der Zuschlag (Quarz) ist klar begrenzt und von weiß über gelb und blau bis rot gefärbt.



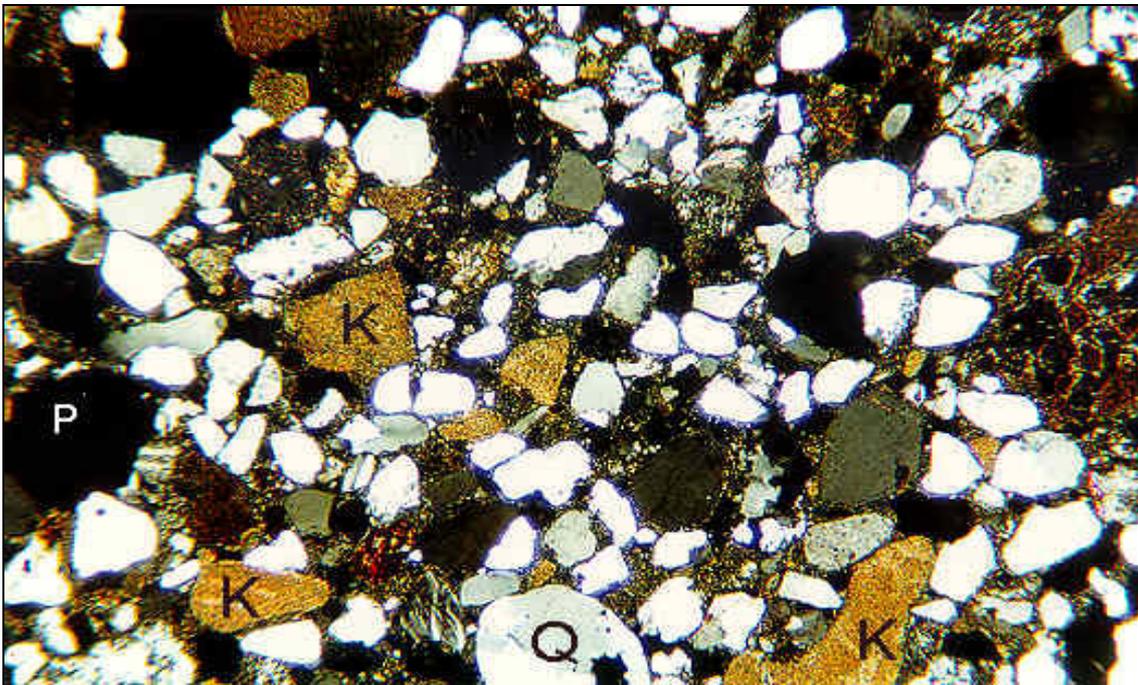
— 135 µm

Bild 16: Polarisationsmikroskopische Dünnschliffaufnahme des Kalkputzes PM3 (Magdeburger Dom) mit gekreuzten Polarisatoren (XPL). Der Kalkputz ist an der Oberfläche sulfatisiert, dunkle Zone. Auf der Oberfläche liegt ein dünner Film eines Kunstharzanstriches.



— 34 μm

Bild 17: Mikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffes des Kalkputzes PM3 (Magdeburger Dom) mit gekreuzten Polarisatoren (XPL). In einem Riß entlang eines Zuschlagkornes hat sich Gips gebildet. Der abgebildete Bereich liegt etwa 1 cm unterhalb der Oberfläche.



— 340 μm

Bild 18: Polarisationsmikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffes des Kalkputzes PL3 (Torhalle Lorsch) mit gekreuzten Polarisatoren (XPL). Der Kalkputz enthält neben Quarzzuschlag (Q) und Poren (P) auch hellbraune Kalkspatzen (K).

4.2.2 Bestimmung der Mörtelzusammensetzung nach Wisser/Knöfel

Die quantitative Bestimmung der Mörtelzusammensetzung erfolgte nach dem in Kapitel 3.4.1 geschilderten Verfahren. Dabei wurde auf den Nachweis des Proteingehaltes verzichtet, da wegen der Empfindlichkeit der Methode eventuell vorhandene Mikroorganismen zu Fehlinterpretationen geführt hätten.

Für die Mörteluntersuchungen standen bei den meisten Proben ausreichend große Mengen zur Verfügung. Nur ein geringer Anteil der untersuchten Kalkputze wies eine kleinere Menge als ca. 90 g auf. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind Tabelle 8 und Tabelle A7 im Anhang zu entnehmen.

Die Ergebnisse zeigen bei den Mörteln einer Bauperiode deutliche Schwankungen der Mörtelzusammensetzung, siehe Tabelle A7 im Anhang, eine Ursache händischer Verarbeitung.

Dennoch lassen sich abhängig vom Bauwerk eindeutige Aussagen über die mittlere Zusammensetzung der am Bauwerk befindlichen Mörtel machen. In Tabelle 8 sind die mittleren Zusammensetzungen der Putzmörtel der verschiedenen Bauwerke aufgelistet und, sofern dies möglich ist, nach verschiedenen Bauphasen unterschieden. Auffällig weisen die Putze des Magdeburger Domes aus dem 13. Jahrhundert einen höheren Bindemittelanteil auf als die Mauermörtel aus dem selben Zeitraum.

Tabelle 8: Mittelwerte der Mörteluntersuchungen der historischen Putze, darin Bindemittelgehalt als CaCO_3 (CaCO_3) und HCl-lösliches SiO_2 (lösl. SiO_2), Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf CaCO_3 als Bindemittel ($\text{B}/\text{Z}_{\text{CaCO}_3}$) und auf $\text{Ca}(\text{OH})_2$ als Bindemittel ($\text{B}/\text{Z}_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$) und Kalkspatzen-Anteil, (GT = Gewichtsteile)

Probe	CaCO_3 / M.-%	lösl. SiO_2 / M.-%	$\text{B}/\text{Z}_{\text{CaCO}_3}$ / GT	$\text{B}/\text{Z}_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ / GT	Kalkspatzen- Anteil / Vol.-%
Torhalle Lorsch Bauperiode					
karolingisch	31,0	0,9	1:2,3	1:3,1	4-5
gotisch	27,2	1,3	1:2,7	1:3,6	3
30er Jahre	27,2	1,2	1:2,8	1:3,8	0
Einhardbasilika in Steinbach					
karolingisch	44,3	3,2	1:1,1	1:1,5	3-5
Magdeburger Dom					
13. Jahrh. Putzm.	43,7	8,5	1:0,9	1:1,2	3-5
13. Jahrh. Fugenm.	26,1	2,2	1:2,6	1:3,4	3-5
jüngere Kalkmörtel	18,8	2,8	1:3,8	1:4,9	3-5
zementh. Putzm.	31,8	3,9	1:1,8	1:2,3	0
ehem. Zisterzienserkloster Heydau					
17. Jahrh.	48,8	4,1	0,8	1,1	3-5

Insgesamt schwanken die Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse aller untersuchten Kalkmörtel zwischen 1:6,6 und 1:0,9 (15 und 52 M.-% Bindemittel), ein Bereich, der auch von anderen Autoren bestimmt wurde (z. B. BIEHL 1927, BIEHL 1930, SCHÄFER 1988, WISSER 1989 und SCHÄFER 1993A). BOENKENDORF 1995 ermittelte an Kalkputzen historischer Fachwerkhäuser mittlere B/Z-Werte von 1:1,9⁹⁶.

Die Anteile an HCl-löslichem SiO₂ lassen den Schluß zu, daß in der Einhardbasilika in Steinbach und dem ehemaligen Zisterzienserkloster Heydau in Morschen Kalke mit hydraulischen Anteilen zum Einsatz kamen, während in der Torhalle in Lorsch reine Kalkmörtel verwendet wurden.

Gewisse Zweifel an dieser Aussage bleiben bestehen, da die Festigung der Putze in der Einhardbasilika mit Kieselsäureester nicht ausgeschlossen wird. Ein Hinweis kann der unterschiedliche Gehalt an HCl-löslichem SiO₂ der Mörtel aus der Basilika und dem Lapidarium sein, die (Probe PS4) einen ca. 1 M.-% geringeren Anteil an löslichem SiO₂ aufweist.

Beim ehemaligen Zisterzienserkloster Heydau ist der Einsatz von Ziegelmehl und Schlacken zur Erhöhung der Festigkeiten aufgrund der Ergebnisse der Mikroskopie nicht auszuschließen.

Die Putze des Magdeburger Domes können hier nicht klassifiziert werden, da sie in diesem Jahrhundert mit Kieselsäureestern gefestigt wurden, was zu teilweise enorm hohen Gehalten an HCl-löslichem SiO₂ geführt hat, z. B. Probe PM8 mit 10,8 M.-% löslichem SiO₂.

Die in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse machen deutlich, daß die Putzmörtelzusammensetzungen der Torhalle in Lorsch über viele Jahrhunderte hinweg innerhalb gewisser Grenzen konstant blieben. Dies läßt den Schluß zu, daß die Zusammensetzung der alten Putze vor späteren Baumaßnahmen im 12. bis 16. Jahrhundert bekannt gewesen sein muß. Bei Restaurierungsarbeiten zu Beginn dieses Jahrhunderts sind sicherlich Untersuchungen hinsichtlich der Zusammensetzung der historischen Putze unternommen worden. Kenntnisse über die Methodik der Untersuchung der Zusammensetzung historischer Mörtel waren zu Beginn dieses Jahrhunderts in ausreichendem Umfang vorhanden, z. B. BIEHL 1927.

Der Kornaufbau der Zuschläge ist abhängig vom Rohstoffvorkommen. So lassen sich abhängig vom Bauwerk Unterschiede in der Zusammensetzung feststellen, siehe Bild 19 und Tabelle A8 im Anhang.

Besonders deutlich wird dies bei den Mörteln der Torhalle in Lorsch, wo über verschiedene Bauperioden hinweg Zuschläge mit fast identischer Zusammensetzung zum

⁹⁶ BOENKENDORF 1995: S. 37

Einsatz kamen. Dies läßt den Schluß zu, daß möglicherweise für die verschiedenen Bauphasen ein Vorkommen über Jahrhunderte hinweg zur Verfügung stand.

Bei den Zuschlägen der Putze des Magdeburger Domes ist festzustellen, daß der Kornaufbau der Putze aus dem 13. Jahrhundert den geringsten Feinstkornanteil aufwies, der im Laufe der Jahrhunderte immer mehr anstieg.

Den Sieblinien der vier untersuchten Objekte ist die Fuller-Sieblinie in Bild 19 gegenübergestellt. Interessant ist die Nähe der mittleren Sieblinie der Zuschläge der Einhardbasilika in Steinbach zur Fuller-Sieblinie.

Für die Zuschläge der untersuchten Putze aller Bauwerke sind fast ausschließlich Sande der Körnung 0-1 mm mit einem Überkornanteil von ca. 10 M.-% verwendet worden. Das Überkorn kann bis zu 4 mm Durchmesser erreichen. Der Körnungsschwerpunkt lag bei 3 Objekten zwischen 0,125 und 0,50 mm und beim Magdeburger Dom zwischen 0,25 und 1,0 mm.

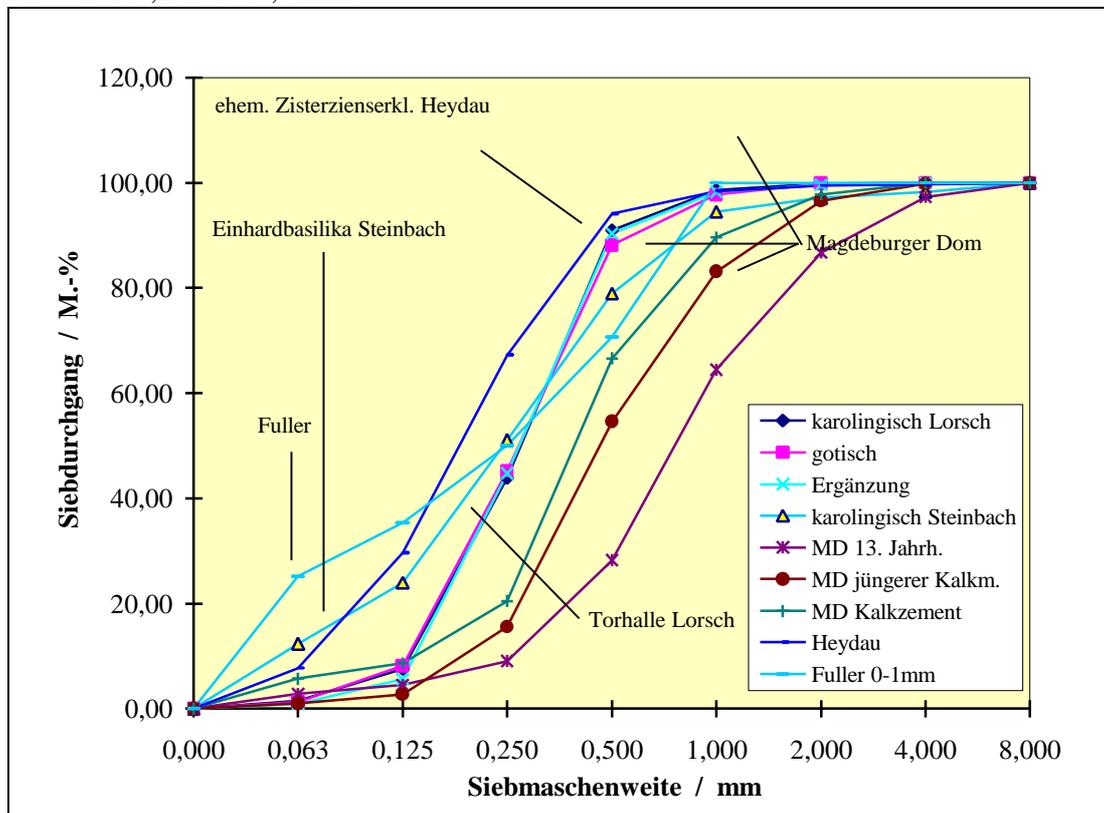


Bild 19: Siebdurchgang der Putzzuschläge der historischen Kalkputze aus der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika in Steinbach, des Magdeburger Domes und des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau in Morschen/Hessen

4.2.3 Bestimmung des Gehaltes wasserlöslicher Salze

Die Bestimmung des Gehaltes an wasserlöslichen Salzen, hier der Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ und K^+ sowie der Anionen SO_4^{2-} , Cl^- und NO_3^- , erfolgte an Putzproben der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika in Steinbach und des Magdeburger Domes. Bei einigen Proben konnte der Gehalt an wasserlöslichen Salzen in Abhängigkeit von der Tiefe in zwei Schichten (0-6 mm und 7-12 mm) ermittelt werden (Torhalle Lorsch, Magdeburger Dom), siehe Tabelle A9 im Anhang.

Meist kommen bei Innen- als auch bei Außenputzen erhöhte Sulfatgehalte vor. Sie erreichen in der äußeren Schicht (0-6 mm) hohe bis sehr hohe Werte und fallen bei Innenputzen in der inneren Schicht (7-12 mm) praktisch auf Null. Außenputze weisen in dieser Zone noch deutliche Sulfatgehalte auf. Diese Ergebnisse bestätigen die mikroskopischen Untersuchungen, wo nur bei den Außenputzen auch in größerer Tiefe die Bildung von Gips nachweisbar war.

Die ermittelten Nitrat- und Chloridgehalte waren in der Regel unbedeutend. Deutlich erhöhte Werte fielen nur bei Putzen der Einhardbasilika auf. Hier besteht der Verdacht, daß weiße Schleier infolge einer Kieselsäureesterfestigung mit Salzsäure entfernt wurden, was zu erhöhten Chloridgehalten im Mörtel geführt hat. Für die hohen Nitratgehalte können Immissionsbelastungen durch benachbarte Landwirtschaft und/oder mikrobielle Aktivität verantwortlich gemacht werden.

4.2.4 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der Proben sind in Tabelle A10 im Anhang aufgeführt.

Aufgrund der geringen Probemengen und der ungünstigen Probengeometrie der restlichen Putzproben konnte nur von den Mörteln der Einhardbasilika die Druckfestigkeit (β_D) und der dynamische E-Modul (E_{dyn}) wie auch von der Probe PM5 (Magdeburger Dom) der E-Modul bestimmt werden.

Die Kalkmörtel der Einhardbasilika weisen für Kalkmörtel relativ hohe Festigkeiten mit ca. 4 N/mm² auf, entsprechend hoch sind die dynamischen E-Moduln, während die Probe aus dem Lapidarium deutlich niedrigere Festigkeiten aufweist. Die Festigkeiten der Mörtel liegen in einem Bereich, den auch andere Autoren für Kalkputze und Kalkmörtel bestimmten (PENKALA 1988, BOENKENDORF 1995). Der relativ hohe Gehalt an löslichem SiO_2 und die hohen Festigkeiten deuten daraufhin, daß hier Binde-

mittel zum Einsatz kamen, die einen gewissen Gehalt an Hydraulefaktoren aufwiesen und heute als CL 70 oder HL 2⁹⁷ bezeichnet würden.

Möglicherweise kann auch die Kieselsäureesterfestigung zur Erhöhung der Druckfestigkeiten beitragen und den E-Modul erhöhen. Ein Hinweis hierfür kann die niedrigere Festigkeit der Probe aus dem Lapidarium sein, die zudem einen niedrigeren Gehalt an löslichem SiO₂ aufweist als die beprobten Mörtel aus der Einhardbasilika.

Die höheren Festigkeiten der Mörtel vor Ort kann aber auch durch Taubildung bedingt sein, die zu Umkristallisationen des CaCO₃ führen kann und damit zur Ausbildung höherer Festigkeiten (HENKEL 1955, NEY 1967, HOFFMANN 1994).

4.2.5 Hygrische Eigenschaften

An geeigneten Proben konnten folgende hygrische Eigenschaften ermittelt werden: die Sorptionsfeuchte (u_m), der Wasseraufnahmekoeffizient (ω), Wasseraufnahme (w_m), Wasserabgabe (w_{ab}) und die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ -Wert). An den Putzen der Einhardbasilika konnte zudem das Wasserabgabeverhalten genauer untersucht werden. Hier fielen zusätzlich an: Wassergehalt der Proben beim Übergang zum zweiten Trocknungsabschnitt (w_{knick}), dessen Zeitpunkt (t_{knick}), das Verhältnis der im ersten Trocknungsabschnitt abgegebenen Wassermenge zum Anfangswassergehalt (w_{kn}), die Verdunstungsstromdichte im ersten Trocknungsabschnitt (\dot{m}_{knick}) und der Wasserabgabekoeffizient (w_{ak}). Die hygrischen Eigenschaften der Mörtel sind Tabelle A12 im Anhang, die standortbezogenen Mittelwerte Tabelle 9 zu entnehmen.

Wegen der geringen Abmessungen der Proben konnte der Wasseraufnahmekoeffizient der Proben der Torhalle in Lorsch anfangs nicht bestimmt werden. Erst nach Modifizierung des Verfahrens nach DIN 52617 gelang deren Bestimmung zu einem späteren Zeitpunkt an ausgesuchten Proben. Hierzu war es erforderlich, die Wägungen beim Wasseraufnahmekoeffizienten in der ersten Minute alle 5-15 sec und danach alle 30 sec durchzuführen. Die Zeiten waren zum einen von den Probekörperabmessungen, zum anderen von deren Saugverhalten abhängig. Die Durchfeuchtung der Proben erfolgte wegen der geringen Probendicke nach wenigen Minuten. Diese Erfahrungen konnten bei den Mörteln der anderen Objekte genutzt werden.

Wegen nicht ausreichender Probemengen konnten von den Mörteln des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau keine hygrischen Eigenschaften ermittelt werden.

⁹⁷ Bezeichnung der Baukalke seit der Neufassung der DIN 1060. Siehe auch Fußnote 44, Seite 35 und Tabelle A**Fehler! Textmarke nicht definiert.** im Anhang

Die historischen Mörtel weisen gegenüber salzunbelasteten Proben, vergleiche BÖTTGER 1994⁹⁸, ca. 10fach höhere Sorptionsfeuchtegehalte bei 53 % und 80 % rel. Luftfeuchte auf.

Wegen unzureichender Probekörperabmessungen konnten sowohl die hygrischen Dehnungen wie auch die Sorptionsdehnungen nicht ermittelt werden. Gleichwohl ist diese Bestimmung zur genauen Beschreibung der Mörtel­eigenschaften wünschenswert. WENDLER 1993 ermittelt an salzbelasteten Natursteinen die Zunahme der hygrischen Dehnungen um das Mehrfache.

Tabelle 9: Hygrische Eigenschaften der historischen Putze; Sorptionsfeuchte bei 53 % rel. Luftfeuchte (u_{m53}) und 80 % rel. Luftfeuchte (u_{m80}), Wasseraufnahmekoeffizient (ω), Wasseraufnahmegrad nach 24 h (w_{m24}) und absolut (w_m), Wasserabgabekoeffizient (w_{ak}), Wasserabgabegrad nach 24 h (w_{ab24}) und Wasserabgabegrad absolut (w_{ab}) sowie Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ -Wert)

Standort	u_{m53} / M.-%	u_{m80} / M.-%	ω / kg/(m ² ·√h)	w_{m24} / M.-%	w_m / M.-%	w_{ak} / kg/(m ² ·h)	w_{ab24} / M.-%	w_{ab} / M.-%	μ -Wert / -
Lorsch	3,0	n. b.	2,8	n. b.	16,1*	0,11	9,7	13,1	21
Steinbach	1,7	2,8	12,5	19,8 ⁺	21,9 ⁺	0,47	18,9	19,9	14
Magdeburg	1,7	2,1	0,5	1,9 ⁺	5,6 ⁺	0,05	2,4	3,7	69

* nach DIN 52130, Verfahren A

+ Vakuumverfahren, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56

Die Wasseraufnahmekoeffizienten (ω) der Proben, siehe Tabelle A12 im Anhang, waren recht unterschiedlich. So lagen Kalkputze aus Lorsch um 2,5 kg/(m²·√h) und Kalkputze aus der Einhardbasilika bei 12,5 kg/(m²·√h). Der einzige Putz des Magdeburger Domes, welcher die Bestimmung des ω -Wertes erlaubte, war die Probe PM5 mit $\omega = 0,5$ kg/(m²·√h), ein Kalk/Zement-Putz aus diesem Jahrhundert. Der Kunstharzanstrich dieser Probe führt zu einem deutlich reduzierten ω -Wert.

Der Wasseraufnahmegrad (w_m) der Putze lag zwischen 17 und 22 M.-%. Dabei stammen die niedrigen Werte von Putzen der Torhalle in Lorsch und die hohen Werte von der Einhardbasilika in Steinbach. Die Probe PM5 des Magdeburger Domes fällt mit 5 M.-% aus dem Rahmen.

Der Wasserabgabegrad (w_{ab}) der Mörtel war bestimmt durch den Wasseraufnahmegrad und die Sorptionsfeuchten im Normalklima DIN-50014-23/50-2. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß die Mörtel der Torhalle in Lorsch aufgenommenes Wasser wesent-

⁹⁸ BÖTTGER 1994: S. 23 und 24

lich langsamer abgeben als Mörtel der Einhardbasilika Steinbach. Die Wasserabgabekoeffizienten (w_{ak}) der Torhalle lagen im Mittel um den Faktor 4 niedriger als die Mörtel der Einhardbasilika. Der Wasserabgabegrad hat nach 24 Stunden bei Mörteln aus der Basilika einen Wert von 96 % und bei der Torhalle von 74 % erreicht. Der Kalk/Zement-Putz PM5 aus Magdeburg läßt keinen Vergleich zu.

Das Wasserabgabeverhalten der Putze der Einhardbasilika zeigt, daß der Übergang vom ersten zum zweiten Trocknungsabschnitt nach ca. 12-16 Stunden erreicht ist; dabei haben die Proben etwa 60-80 % des aufgenommenen Wassers wieder abgegeben. Die Verdunstungsmassenstromdichten im ersten Trocknungsabschnitt waren entsprechend hoch, aber um ca. 60 % niedriger als die ermittelten Wasserabgabekoeffizienten.

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen der karolingischen Mörtel der Torhalle in Lorsch sind ca. um den Faktor 2 höher als in der Einhardbasilika in Steinbach, während die Putze des Magdeburger Domes wegen des Kunstharzanstriches um ein Mehrfaches höhere Werte erreichen. Grund hierfür sind die Festigungsmaßnahmen sowie der Anstrich der Oberfläche.

Die Ergebnisse liegen im von anderen Autoren bei historischen Mörteln und Putzen bestimmten Bereich (PENKALA 1988, WISSER 1989, BOENKENDORF 1995).

4.2.6 Hg-Druckporosimetrie

Die Ergebnisse der Hg-Druckporosimetrie sind der Tabelle A11 im Anhang zu entnehmen. Die Bestimmung des Porenvolumens und der Porenradienverteilung erfolgte an Putzen der Torhalle und der Einhardbasilika.

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, daß das Porenvolumen der Putze beider Gebäude in etwa vergleichbar ist. Unterschiede treten bei der Porenverteilung der Mörtel auf, wie am Beispiel der Proben PL3 (Torhalle) und PS2 (Einhardbasilika) in Bild 20 zu ersehen ist.

Die Mörtel der Torhalle in Lorsch weisen immer hohe Luftporengehalte auf und eine trimodale Porenverteilung im Gegensatz zu geringen Luftporengehalten und einer bimodalen Porenverteilung der Putze der Einhardbasilika in Steinbach.

SCHÄFER 1988 stellt ähnliche Porenvolumina fest, jedoch liegen die Porenmaxima bei den von ihr untersuchten Mörteln bei geringeren Porenradien.

Der hohe Luftporenanteil, der sich durchlichtmikroskopisch als runde kugelige Poren mit Durchmessern zwischen 50-200 μm zeigt, ist Ursache für die langsame Wasseraufnahme der karolingischen Mörtel. Die Anzahl der Luftporen, deren Form und

Häufigkeit im Bereich von 10-1 μm , lassen darauf schließen, daß möglicherweise schon damals Luftporenbildner eingesetzt wurden. Die Wirkung von Proteinen wie Blutplasma, Casein usw., die sowohl die Verarbeitungs- und Festmörteleigenschaften verbessern als auch Luftporen eintragen, beschreibt BOENKENDORF 1995. Dabei erhöht der Zusatz von Blutplasma den Luftporenanteil im Bereich von 10-1 μm ähnlich wie bei den hier untersuchten historischen Mörteln der Torhalle in Lorsch und der Einhardbasilika.

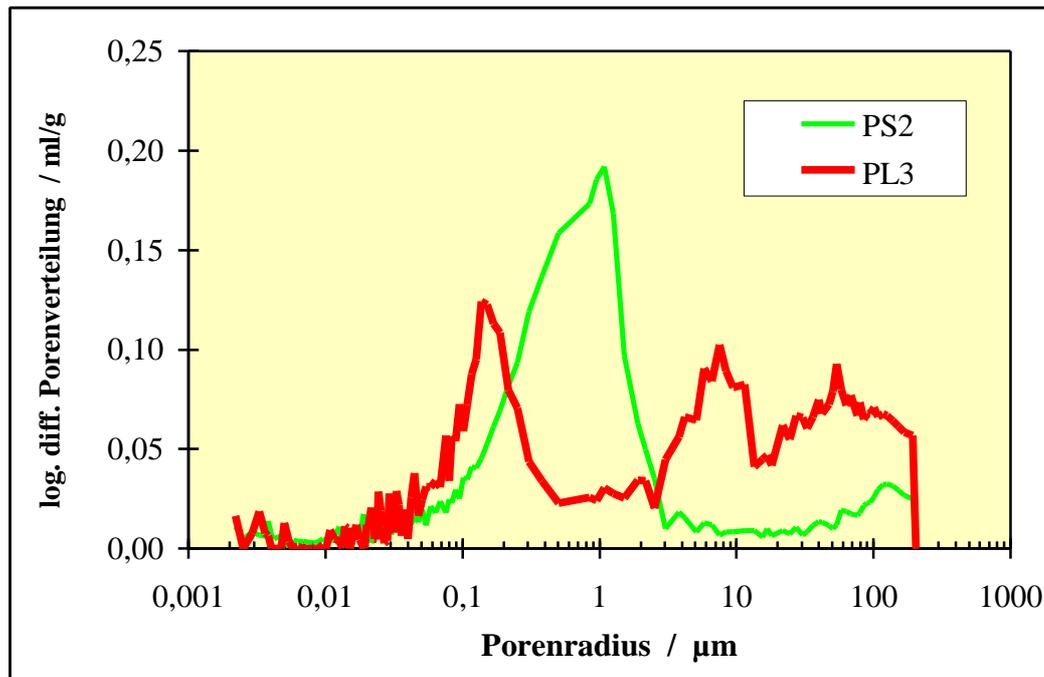


Bild 20: Porenradienverteilung (PRV) karolingischer Putze aus der Torhalle in Lorsch (PL3) und der Einhardbasilika in Steinbach (PS2)

4.3 Zusammenfassung zu Kapitel 3

Der naßchemische Trennungsgang an Kalkputzen und z. T. Fugenmörteln der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika in Steinbach, des Magdeburger Domes und des ehemaligen Zisterzienserklosters in Heydau hat gezeigt, daß Mörtel mit unterschiedlichen Bindemittelanteilen zum Einsatz kamen. Im Durchschnitt liegt das Bindemittel/Zuschlagverhältnis (B/Z) bezogen auf $\text{Ca}(\text{OH})_2$ als Bindemittel bei den Mörteln der Torhalle in Lorsch bei 1:3,6, bei der Einhardbasilika in Steinbach bei 1:1,6, beim Magdeburger Dom bei den Putzen aus dem 13. Jahrhundert bei 1:1,2 und beim Zisterzienserkloster Heydau bei 1:1,1. Die B/Z schwanken innerhalb der genannten Mittelwerte deutlich. Als Bindemittel kamen bei den historischen Mörteln ausschließlich Kalkmörtel zum Einsatz. Ihr Anteil an hydraulischen Bestandteilen kann nicht

genau angegeben werden, da z. T. Kieselsäureesterfestigungen stattgefunden hatten, welche die Ergebnisse verfälschten.

Die Zuschläge bestehen ausschließlich aus Quarzsanden mit unterschiedlichen Gehalten an Feldspäten und Schichtsilikaten. Auffällig ist die Beschränkung der Gegenwart von Tonmineralen auf die Zuschläge der Mörtel der Torhalle in Lorsch und des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau. Die Sieblinien sind abhängig von den örtlichen Vorkommen der Zuschläge und aus diesem Grunde regional unterschiedlich, innerhalb der verschiedenen Bau- und Restaurierungsphasen eines Bauwerkes aber ähnlich. Meistens fanden Sande der Körnung 0-1 mm Verwendung mit einem Körnungsmaximum, welches bei drei Objekten, der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika und dem ehemaligen Zisterzienserkloster Heydau zwischen 0,125 und 0,50 mm lag und beim Magdeburger Dom zwischen 0,25 und 1,0 mm. Nur in Ausnahmefällen kamen Sande der Körnung 0-2 mm zum Einsatz. Das Überkorn kann bei den Sanden Korngrößen bis zu 4 mm annehmen.

Die Putze weisen meist hohe Sulfatbelastungen auf, die bei Innenputzen nur auf die Oberfläche begrenzt sind, bei den Außenputzen aber auch in tieferen Putzschichten (7-12 mm) anzutreffen sind. Eine leicht erhöhte Belastung durch Nitrat und Chlorid tritt z. T. bei hohen Sulfatgehalten auf. Örtlich begrenzt auf die Einhardbasilika sind gesteigerte Gehalte an Nitrat und Chlorid feststellbar. Zumindest beim Chlorid können Restaurierungsversuche verantwortlich gemacht werden, bei denen Verfärbungen infolge von Kieselsäureesterfestigungen mit HCl entfernt wurden.

Nur an den Putzen der Einhardbasilika in Steinbach konnte die Bestimmung der Festigkeiten erfolgen. Sie lagen mit 3-4 N/mm² im zu erwartenden Festigkeitsbereich von Kalkmörteln.

Die hygrischen Eigenschaften, bestimmt an Mörteln der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika in Steinbach und dem Magdeburger Dom liegen in einem typischen Bereich für Kalkmörtel. Es sind jedoch Unterschiede festzustellen, geprägt durch die hohen Luftporengehalte der Mörtel der Torhalle in Lorsch. Die Luftporen behindern sowohl die Wasseraufnahme als auch die Wasserabgabe. Die karolingischen Putze der Torhalle Lorsch weisen um den Faktor 4 kleinere Wasseraufnahme- und Wasserabgabekoeffizienten und um den Faktor 2 höhere μ -Werte auf als Mörtel aus der Einhardbasilika in Steinbach.

Die Sorptionsfeuchten aller historischen Mörtel sind durch die Salzgehalte der Mörtel bestimmt. Die Sorptionsdehnungen und die hygrischen Dehnungen konnten mangels Probengröße nicht ermittelt werden, obwohl dies zur Beschreibung der Mörtel-eigenschaften der historischen Mörtel wünschenswert wäre.

Mittels Hg- porosimetrie lassen sich vergleichbare Gesamtporenvolumina der Kalkputze feststellen. Die Porenverteilungen unterscheiden sich jedoch erheblich. Mörtel mit einem ursprünglichen Bindemittel aus Kalkhydrat oder Branntkalk (Torhalle Lorsch) weisen eine trimodale und solche aus hydraulischem Kalk (Einhardbasilika in Steinbach) eine bimodale Porenverteilung auf. Die Mörtel der Torhalle in Lorsch weisen hohe Luftporengehalte auf, die mikroskopisch als runde Poren mit Durchmessern zwischen 50 und 200 μm erscheinen. Die Mörtel der beiden genannten Bauwerke weisen zudem hohe Porenanteile im Bereich von 10-1 μm auf. Dies läßt die Vermutung zu, daß schon bei den Mörteln der karolingischen und gotischen Zeit luftporenbildende Zusätze verwendet wurden.

5 Entwicklung von Haftmörteln für die Restaurierung historischer Kalkputze

5.1 Einleitung

Haftmörtel sollen im wesentlichen zur vorbereitenden Abdichtung von Putzen vor der Einbringung von Hinterfüllmörteln dienen und das Auslaufen von Hinterfüllmörteln bei der Applikation verhindern. Dabei haben Haftmörtel nicht nur abdichtende Funktion, sondern sollen die Belastbarkeit der Putze gegen den bei der Hinterfüllung auftretenden hydrostatischen Druck erhöhen. Die spätere Entfernbarkeit mit einfachen mechanischen Methoden muß gewährleistet sein, ohne daß Schäden am Putz oder Untergrund erzeugt werden. Zusätzliche Anforderungen stellen sich für den geplanten Einsatz beim Wiederbefestigen abgängiger Putzschollen. Literatur über Mörtel für die geschilderten Anwendungsfälle ist nicht bekannt.

Diese Anforderungen bedingen die Entwicklung hydraulisch erhärtender, minderefester Mörtel mit hohen Haftzugfestigkeiten und häufig mit großem Sulfatwiderstand. Mörtel auf Basis Weißkalkhydrat benötigen zuviel Zeit zur Erhärtung, insbesondere bei der Wiederbefestigung abgängiger Bereiche. Zudem neigen sie zu starkem Schwinden und infolge dessen zu Flankenabrissen, was die Haftung und die abdichtende Funktion der Haftmörtel beim Einbringen der Hinterfüllmörtel beeinträchtigt.

Die Entwicklung der Haftmörtel ist in zwei Schritten geplant. Zunächst soll in Vorversuchen in einem eingeschränkten Versuchsprogramm die Eingrenzung geeigneter Mörtel stattfinden. In den Hauptversuchen soll dann die Modifizierung der geeignetsten Mörtel sowie deren Prüfung erfolgen.

In den Vorversuchen soll zudem der Sulfatwiderstand nach dem Verfahren Koch/Steinegger und in gesättigter Gipslösung geprüft werden. Dabei sind auch die für die Hinterfüllmörtel in Frage kommenden Bindemittel mit in die Prüfung einzubeziehen. Der Nachweis eines hohen Sulfatwiderstandes einiger auch im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Bindemittelgemische, z. B. des HGZ und des HOZ/KStM, wurde von HENKEL 1994 nach anderen Verfahren erbracht.

5.2 Anforderungsprofil an die Haftmörtel

Aus den in der Einleitung geschilderten Anwendungsfällen ergibt sich unter Berücksichtigung des Mauerwerkes, der Putzregel sowie der Eigenschaften der untersuchten historischen Kalkmörtel, siehe Kapitel 4, das Anforderungsprofil. Die Haftmörtel für die genannten Bauwerke sollen die folgenden Festmörteleigenschaften aufweisen:

- Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ} > 0,2 \text{ N/mm}^2$
- Druckfestigkeit $\beta_D \geq 1,5 \text{ N/mm}^2$

- E-Modul $E_{dyn} < 10000 \text{ N/mm}^2$
- Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ -Wert $< 50^{99}$
- Wasseraufnahmekoeffizient $\omega < 10 \text{ kg/(m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$
- geringe hygri-sche Dehnungen
- hoher Sulfatwiderstand, da der historische Bestand durch Umwelteinflüsse belastet ist
- geringe Ausblühneigung
- hoher Frost-Tauwechsel-Widerstand (FTW)
- leicht und ohne die Altsubstanz zu schädigen wieder abnehmbar sein

Damit sind die Anforderungen an die Haftmörtel genauer spezifiziert als die Anforderungen an Putzmörtel nach KNÖFEL 1993, siehe Tabelle 5, Seite 34. Dieses Anforderungsprofil gilt nur für die hier untersuchten Bauwerke.

5.3 Verwendete Materialien

5.3.1 Bindemittel und Zusätze

Für die Haftmörtel incl. der Vorversuche kamen die folgenden Bindemittel bzw. Zusätze zum Einsatz:

HGZ aus: 83 M.-% **HüS** Hüttensand
 10 M.-% **Gips** gemahlener Naturgips
 7 M.-% **PZ** CEM I 42,5 R HS/NA

HOZ CEM III/B 32,5 HS/NW/NA

KStM Kalksteinmehl

Mikro hochfeiner gesichteter Hochofenzement

TZ Tonerdezement

WKH CL90

Die chemischen Analysen, die Sieblinien der Bindemittel und Zusätze sowie die spez. Oberflächen der Bindemittel sind den Tabellen A14 und A15 im Anhang zu entnehmen.

5.3.2 Zuschlag

Als Zuschlag für die Haftmörtel wurde gemahlener Quarzsand verwendet:

SP10 Quarzmehl SP 10, zu 97 M.-% kleiner $90 \mu\text{m}$

Dieser feinkörnige Zuschlag sollte zum einen die Festigkeiten senken, zum anderen die spätere Abnehmbarkeit erleichtern. Die Senkung der Festigkeiten bei Verwendung

⁹⁹ Die μ -Werte von Natursteinen liegen nach Untersuchungen von METZ 1992, S. 38 zwischen 30 und 700. Da die Haftmörtel zwischen Putzuntergrund und Kalkmörtel eingebracht werden, ist der gewählte μ -Wert ausreichend niedrig.

sehr feinen Zuschlags ist bedingt durch die zu normalem Zuschlag relativ größere Oberfläche und des dadurch verursachten höheren Wasseranspruchs der Mörtel.

5.3.3 Zusatzmittel

Den Haftmörteln wurden im Rahmen der Hauptuntersuchungen folgende Zusatzmittel zur Verbesserung der mechanischen und hygrischen Eigenschaften zugesetzt:

Kd P Kunststoffdispersionspulver (Copolymerisat-Pulver aus Vinylacetat und dem Vinylester einer langkettigen verzweigten Carbonsäure)

MC Methylhydroxyethylcellulose

MC dient zur Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens der Haftmörtel. Dies bedingt die Reduzierung der Gefahr des Verdurstens der Mörtel und infolgedessen eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften; hierüber berichten z. B. MANN 1979 und MEHLMANN 1984.

Die Zugabe von Kunststoffdispersionspulver soll die E-Moduln senken und die Haftzugfestigkeit der Mörtel verbessern (SCHULZE 1993, BOENKENDORF 1995). Zudem können die hygrischen Eigenschaften beeinflusst werden. HUESMANN 1994 und BOENKENDORF 1995 stellen bei mit Kunststoffdispersion vergüteten Mörteln eine Reduzierung des Wasseraufnahmekoeffizienten BOENKENDORF 1995 und BOENKENDORF 1996 eine Erhöhung der μ -Werte fest.

5.3.4 Untersuchungsmethoden

Die folgenden Frisch- und Festmörteleigenschaften der Haftmörtel wurden geprüft:

Frischmörteluntersuchungen:

- Konsistenz und Wasseranspruch, siehe Kapitel 3.2.1, Seite 50
- Wasserrückhaltevermögen, siehe Kapitel 3.2.2, Seite 50

Festmörteluntersuchungen:

- hygrische Dehnung: 1. Schwinden, Quellen, 2. Schwinden, siehe Kapitel 3.3.2.2, Seite 54
- Biegezug- und Druckfestigkeit, siehe Kapitel 3.3.1.2 und 3.3.1.3, Seite 52
- Haftzugfestigkeit, siehe Kapitel 3.3.1.4, Seite 52
- dynamischer Elastizitätsmodul, siehe Kapitel 3.3.1.1, Seite 52
- Wasseraufnahme, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56
- Wasserabgabegrad, siehe Kapitel 3.3.2.7, Seite 56
- Austrocknungsverhalten, siehe Kapitel 3.3.2.7, Seite 56
- Wasserdampf-Diffusion; siehe Kapitel 3.3.2.3, Seite 54
- innere Oberfläche, siehe Kapitel 3.3.2.5, Seite 55
- Sorptionsfeuchten; und Sorptionsdehnungen, siehe Kapitel 3.3.2.4, Seite 55

- Ausblühverhalten, siehe Kapitel 3.3.3, Seite 59
- Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalyse, siehe Kapitel 3.4.4, Seite 49
- Wärmedehnungskoeffizient; siehe Kapitel 3.3.6, Seite 60
- Frost-Tauwechsel-Widerstand, siehe Kapitel 3.3.1.6, Seite 53
- Sulfatwiderstand nach Koch/Steinegger, siehe Kapitel 3.3.4, Seite 59
- Sulfatwiderstand in gesättigter Gipslösung, siehe Kapitel 3.3.4, Seite 59
- Porosität und Porenradienverteilung, siehe Kapitel 3.3.5, Seite 59
- Untersuchungen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM), Kapitel 3.4.5, Seite 62

5.3.5 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte nach DIN 1164, Teil 5. Abweichend war der Wasser/Bindemittelwert (W/B). In Anlehnung an die DIN 18555, Teil 3, Abschnitt 3.2.4 wurde der Frischmörtel in die Prismenformen gefüllt und nach dem Vibrationsverfahren verdichtet. Die Vibrationsdauer mußte bei den Mörteln mit Zusatz von MC wegen ihrer Klebrigkeit verdoppelt werden. Beim Anrühren des Mörtels wurden unvermeidlich Luftblasen in den Frischmörtel eingerührt, die sich wegen der Konsistenz der Mörtel nur schwierig entlüften ließen. Durch eine Verdopplung der Verdichtungszeit konnte dies jedoch erreicht werden. Um für alle Mörtel gleiche Bedingungen zu gewährleisten, wurde die Verdichtungsdauer bei allen Mörtelmischungen verdoppelt. Die Lagerung der Normprismen und Wasserdampf-Diffusionsplatten erfolgte bis zum Alter von 7 Tagen nach DIN 18555, Teil 3 Abschnitt 4 (Feuchteschrank). In den verbleibenden Tagen bis zu den Prüfterminen lagerten die Prismen im Normalklima DIN 50014-23/50-2. Ausnahme waren die Prismen für die Wasseraufnahme. Diese wurden zunächst 28 Tage im Feuchteschrank bei 20°C und 95 % relativer Luftfeuchte und danach 14 Tage im Normalklima DIN 50014-23/50-2 gelagert. Diese unterschiedliche Verfahrensweise fand Anwendung, um die Wasseraufnahme an relativ gut hydratisierten Proben zu untersuchen.

Zur Herstellung und Lagerung der Mörtel - Verbundkörper wurden sandgestrahlte Beton-Gehwegplatten der Maße 30x30x5 cm verwendet. Die Herstellung erfolgte in Anlehnung an DIN 18555, Teil 6. Die Gehwegplatten lagerten ca. 30 Minuten vor dem Aufbringen des Frischmörtels 1 Minute lang in Wasser, um eine praxisnahe Befuchtung der Oberfläche zu simulieren. Die 30minütige Abtrocknung führte zu einem mattfeuchten Zustand der Oberfläche. Die hergestellten Verbundkörper verweilten zunächst mit Folie abgedeckt 3 Tage im Labor, anschließend bis zu dem Prüftermin nach DIN 18555, Teil 3.

5.4 Ergebnisse der Voruntersuchungen

5.4.1 Zusammensetzung der Haftmörtel der Vorversuche

Im Rahmen der Vorversuche wurden Mörtel mit verschiedenen Bindemitteln bzw. Bindemittelmischungen auf ihre Eignung als Haftmörtel geprüft. Damit sollte die grundsätzliche Eignung des Konzepts der Haftmörtel untersucht werden, um in einem zweiten Schritt die geeignetsten Mischungen im Rahmen der Hauptuntersuchungen zu optimieren. Die Bindemittel wiesen folgende Zusammensetzung auf:

- WKH/HOZ mit 70/30; 50/50 und 30/70 M.-%
- KStM/Mikro mit 70/30 und 50/50 M.-%
- WKH/Mikro mit 70/30 und 50/50 M.-%
- TZ/HüS/KStM mit 50/50/0, 33,3/33,3/33,3, 25/25/50 und 50/0/50 M.-%
- TZ/WKH mit 90/10 und 80/20 M.-%
- HGZ mit 83 M.-% HüS, 10 M.-% Gips und 7 M.-% PZ

Das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis (B/Z) der Haftmörtel der Vorversuche lag bei 1:3, die Zusammensetzung der Mörtel ist in Tabelle A16 im Anhang angegeben. Die Konsistenz der Mörtel wurde mittels Ausbreittisch auf $17,5 \pm 0,5$ cm eingestellt.

5.4.2 Frischmörteluntersuchungen

Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen sind Tabelle A20 im Anhang zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen einen hohen Wasseranspruch (WA) der Haftmörtel der Vorversuche bedingt durch die Verwendung des Quarzmehles als Zuschlag. Die Wasser/Bindemittel-Werte (W/B) liegen zwischen 1,13 und 1,46. Dabei ist festzuhalten, daß WKH den Wasseranspruch stets deutlich steigert, andererseits aber das Wasserrückhaltevermögen (WRV) der Mörtel verbessert.

5.4.3 Festmörteluntersuchungen

5.4.3.1 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der Haftmörtel der Vorversuche sind in Tabelle A21 im Anhang dargestellt.

Die Festigkeiten der Haftmörtel sollen im Bereich bzw. geringfügig über denen von Kalkmörtel liegen. Damit ist die Putzregel gewahrt, da die Festigkeit kontinuierlich vom Putzuntergrund über den Haftmörtel zum Kalkputz abnehmen soll. Die Festigkeit ist nach oben durch die Forderung begrenzt, die Haftmörtel, ohne die Altsubstanz zu schädigen, wieder entfernen zu können. Die im Rahmen der Voruntersuchungen ge-

prüften Haftmörtel weisen bis auf die Mörtel VH3, VH5, VH8 ($\beta_D > 10 \text{ N/mm}^2$ und $E_{\text{dyn}} > 10000 \text{ N/mm}^2$), VH10 und VH14 ($\beta_D < 1,5 \text{ N/mm}^2$) ausreichend hohe Festigkeiten und E-Moduln auf. Lediglich die Haftung am Untergrund bedarf deutlicher Verbesserung.

Die Festigkeitsentwicklung der Haftmörtel ist erwartungsgemäß abhängig von der Art des hydraulischen Bindemittels und der Lagerungsdauer.

5.4.3.2 Hygrische Eigenschaften

Die hygrischen Eigenschaften der Haftmörtel der Vorversuche wurden eingeschränkt geprüft. So fand nur die Bestimmung des hygrischen Dehnungsverhaltens statt. Die hygrischen Dehnungen der Haftmörtel sind Tabelle A20 im Anhang zu entnehmen.

Das 1. Schwinden (ϵ_{s1}) der Mörtel ist sehr unterschiedlich und wird von den Bindemitteln geprägt. Günstige Ergebnisse zeigen die Haftmörtel auf Basis TZ (-0,55 bis -0,82 mm/m) und HGZ (-1,05 mm/m). Ungünstig verhalten sich Hochofenzemente, HOZ (-2,78 bis -9,43 mm/m) und Mikro (-2,68 bis -5,01 mm/m), dabei wirkt sich WKH-Zusatz in der Regel negativ aus und führt in Abhängigkeit von der Zusatzmenge stets zum höchsten Schwinden. Interessant ist, daß sich WKH nicht in jedem Falle ungünstig auf ϵ_{s1} auswirkt. So weisen die Haftmörtel VH13 und VH14 mit 10 bzw. 20 M.-% WKH auf Basis des Tonerdezementes trotz des höchsten Wasseranspruches das niedrigste 1. Schwinden (-0,28 bis -0,55 mm/m) auf.

Das Quellen (ϵ_q) und 2. Schwinden (ϵ_{s2}) der Mörtel bewegt sich in einem weiten Bereich. Anders als beim ersten Schwinden führen nicht die carbonatisch, sondern die hydraulisch erhärtenden Bindemittel zu größeren Dehnungen. Dabei verhalten sich die Mörtel VH1, VH4, VH5, VH10 und VH14 besonders günstig. Alle anderen Mörtel weisen bis auf VH3 und VH7 akzeptable Werte auf.

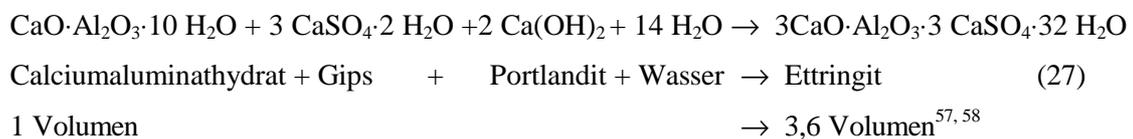
5.4.3.3 Sulfatwiderstand

Die Prüfung des Sulfatwiderstandes der gewählten Bindemittelmischungen erbrachte die in den Tabellen A17-A19 aufgeführten Ergebnisse.

Die Mörtel auf Basis HOZ und Mikro mit KStM-Zusatz sowie mit dem Bindemittel HGZ weisen einen hohen Sulfatwiderstand auf. Der Zusatz von WKH führte entweder zu starken Erhöhungen der relativen Festigkeiten oder zur Zerstörung der Prüfkörper

durch Gipsbildung gemäß Gleichung (9)¹⁰⁰. Deutliche Festigkeitssteigerungen der relativen Biegezugfestigkeiten gehen einer Zerstörung der Prüfkörper voraus (KOCH 1960).

Mörtel mit dem Bindemittel TZ durchlaufen die Prüfung des Sulfatwiderstandes nach Koch/Steinegger nicht ohne völlige Zerstörung. Grund hierfür ist der unzureichende Widerstand der Tonerdezemente gegenüber Alkalisulfaten und deren Lösungen (BICZOK 1968¹⁰¹). Ihr Sulfatwiderstand in gesättigter Gipslösung ist hingegen gut. Jedoch führt diese Lagerung erwartungsgemäß zur völligen Zerstörung der Mörtelprismen nach Gleichung (7)¹⁰², wenn diese WKH enthalten. Die Gegenwart von Portlandit, Sulfat und Calciumaluminathydraten bzw. Aluminiumhydroxid führte, wie röntgenographisch nachweisbar war, zur Bildung von Ettringit und zur schnellen Zerstörung der Mörtel z. B. nach Gleichung (14)¹⁰³ oder folgender Reaktion:



Aus den Ergebnissen geht ein hoher Sulfatwiderstand der Haftmörtel nach dem Verfahren Koch/Steinegger bzw. bei Lagerung in konzentrierter Gipslösung hervor, sofern Bindemittel ohne WKH-Zusatz verwendet wurden.

5.4.4 Zusammenfassung der Voruntersuchungen

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden verschiedene Bindemittel bzw. Bindemittelkombinationen hinsichtlich ihrer Frischmörteleigenschaften, ihrer mechanischen und hygrischen Eigenschaften geprüft. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen, daß einige der in den Voruntersuchungen hergestellten Haftmörtel die gewünschten Eigenschaften, wenn auch nur in Teilbereichen, aufweisen. Die Haftmörtel VH4, VH9, VH11, VH12 der Vorversuche zeigen Festigkeiten, die im Bereich von Kalkmörteln oder etwas höher liegen, einen hohen Sulfatwiderstand und geringes Schwinden. Ihre Haftzugfestigkeiten bedürfen jedoch der gezielten Verbesserung.

Die Ergebnisse zeigen, daß WKH das 1. Schwinden sowie den Sulfatwiderstand sehr negativ beeinflußt und deshalb nicht in den Hauptversuchen eingesetzt wurde. Das Schwinden der Mörtel auf Basis HOZ ist bei der Verwendung geringer Mengen an Zusätzen günstiger als bei dem hochfein gemahlten Mikro. Bei den Hauptversuchen

¹⁰⁰ Gleichung (9), S. 37

¹⁰¹ BICZOK 1968: S. 95

¹⁰² Gleichung (7), S. 37

¹⁰³ Gleichung (14), S. 40

empfiehlt sich deshalb die Verwendung von Bindemittelgemischen aus HOZ und KStM.

Das Wasserrückhaltevermögen der Haftmörtel bedarf der Optimierung, da andernfalls unter Praxisbedingungen die Gefahr des Verdurstens der Mörtel besteht.

5.5 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen

5.5.1 Zusammensetzung der Haftmörtel der Hauptuntersuchungen

Bei der Zusammensetzung der Haftmörtel der Hauptuntersuchungen fanden die Ergebnisse der Vorversuche Eingang. Aus den zuvor genannten Gründen wurden nur noch drei Bindemittel eingesetzt:

- **HGZ** bestehend aus: 83 M.-% HüS, 10 M.-% Gips und 7 M.-% PZ
- **HOZ+** bestehend aus: 70 M.-% HOZ und 30 M.-% KStM
- **TZ++** bestehend aus: 33,3 M.-% TZ, 33,3 M.-% HüS und 33,3 M.-% KStM

Zur Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens erhielten die Haftmörtel einen Zusatz von verschiedenen Mengen Methylhydroxyethylcellulose (MC). Zur Erhöhung der Haftzugfestigkeiten der Mörtel wurde ein Kunststoffredispersionspulver (Kd P) in unterschiedlichen Dosierungen eingesetzt. Die Angabe der Zusammensetzung der Haftmörtel ist Tabelle A16 im Anhang zu entnehmen.

Das B/Z-Verhältnis der Haftmörtel auf Basis HGZ und HOZ+ wurde auf 1:4 erniedrigt, um die Entwicklung zu hoher Festigkeiten zu vermeiden.

5.5.2 Frischmörteluntersuchungen

Der Wasserbedarf zum Erreichen des gewünschten Ausbreitmaßes von $17,5 \pm 0,5$ cm liegt bei den untersuchten Haftmörteln, siehe Tabelle A20 im Anhang, allgemein hoch. Die Modifizierung der Haftmörtel führt zu einer Erhöhung des Wasseranspruches (WA) und des W/B gegenüber den Haftmörteln der Voruntersuchungen. Den niedrigsten WA weisen die Mörtel auf Basis Tonerdezement (TZ++-Mörtel) auf. Annähernd gleich ist der WA bei den HGZ- und HOZ+-Mörteln. Durch den Einsatz von Kunststoffredispersionspulver (Kd P) wird der WA der Mörtel geringfügig, aber unterschiedlich beeinflusst. So erniedrigt das Kd P den WA der HGZ-Mörteln, während es ihn bei den TZ++-Mörteln erhöht. Keine Auswirkung auf den Wasseranspruch ist durch Zugabe von Kd P bei den HOZ+-Mörteln festzustellen. Das zähplastische Verhalten der Mörtel-Nullproben (ohne Zusatzmittel) wird durch den Einsatz von Kunst-

stoffredispersionspulver herabgesetzt, wodurch sich die Verarbeitbarkeit deutlich verbessert. Mit zunehmendem Anteil an MC ist eine Erhöhung des Wasseranspruches der Mörtel festzustellen, und die Verarbeitbarkeit der Frischmörtel wird erschwert.

Zusätze von Kd P und MC verbessern das Wasserrückhaltevermögen (WRV) der Mörtel. Der Zusatz von MC (WRV > 95 %) wirkt sich erwartungsgemäß stärker als der Zusatz von Kd P (WRV 81-88 %) aus. Bei den Mörteln mit einer Kombination beider Zusatzmittel wurde in der Regel das höchste WRV bestimmt.

5.5.3 Festmörteluntersuchungen

5.5.3.1 Mechanische Eigenschaften

In Tabelle A21 im Anhang sind die Ergebnisse der E-Modulprüfungen, der Biegezug-, Druck- und Haftzugfestigkeitsuntersuchungen nach 7 und 28 Tagen Lagerungsdauer angegeben.

Die E-Moduln (E_{dyn}) der untersuchten Mörtel weisen deutliche Unterschiede auf. Sie sind hauptsächlich geprägt vom Bindemittel, dabei sind die E-Moduln bei HOZ+ > HGZ > TZ++. Die E-Moduln erhöhen sich erwartungsgemäß mit dem Alter.

Die Zusatzmittel verändern die Eigenschaften der Haftmörtel günstig; sie erniedrigen die E-Moduln. Dabei übt die MC einen stärkeren Einfluß aus als das Kd P. Die Kombination beider Zusatzmittel bewirkt hier in der Regel eine noch deutlichere Erniedrigung der E-Moduln als der Einsatz nur eines Zusatzmittels in niedriger Konzentration. Die Biegezug- (β_{BZ}) und Druckfestigkeiten (β_{D}) weisen vergleichbare Tendenzen auf, wobei ein deutlich erkennbarer Zusammenhang zwischen den Druckfestigkeiten und den E-Moduln festzustellen ist, siehe Bild 21. Die Mörtel mit den höchsten E-Moduln zeigen erwartungsgemäß auch die höchsten Druckfestigkeiten.

Der Einsatz von Kd P führt zu unterschiedlichen Einflüssen auf die Mörtel. Die TZ++- und HOZ+-Mörtel verhalten sich gleich; es ist eine Festigkeitsabnahme (β_{D} und β_{BZ}) mit zunehmendem Gehalt an Kd P erkennbar. Bei den HGZ-Mörteln läßt sich ein Festigkeitsanstieg durch Kd P feststellen, siehe Bild 22. Die Zugabe von MC erniedrigt bei allen Mörteln die Biegezug- und Druckfestigkeiten. Die Kombination der beiden Zusatzmittel verursacht häufig eine weitere Festigkeitsabnahme.

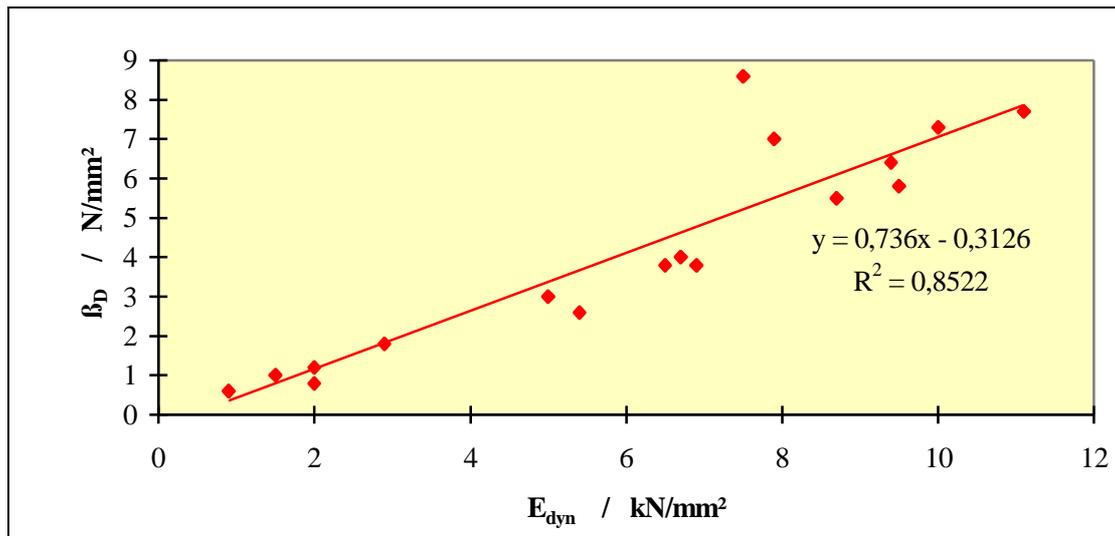


Bild 21: Beziehung zwischen E-Modul (E_{dyn}) und Druckfestigkeit (β_D) der Haftmörtel im Alter von 28 Tagen

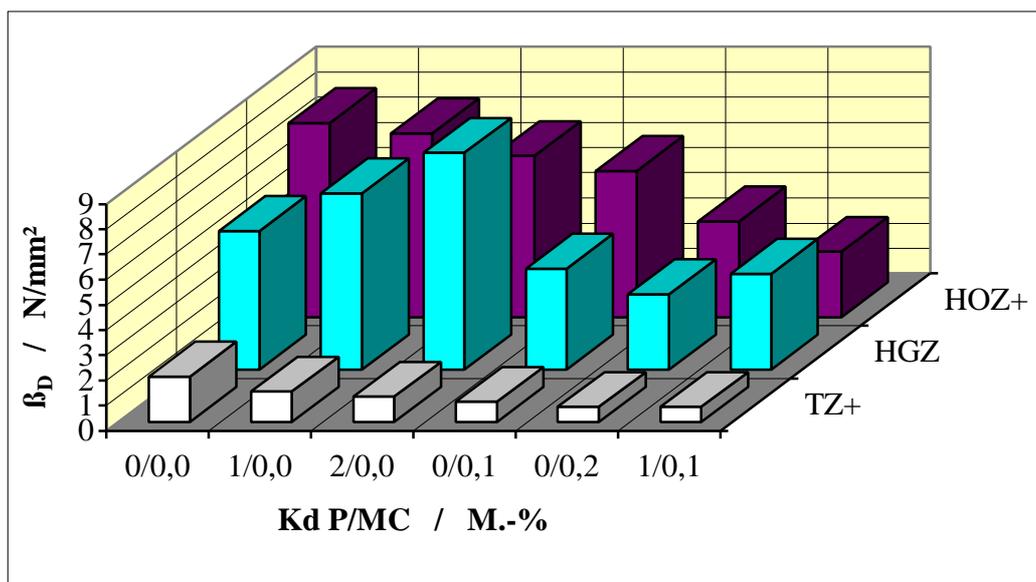


Bild 22: Einfluß von Bindemitteln und Zusatzmitteln auf die Druckfestigkeit (β_D) der Haftmörtel im Alter von 28 Tagen

Eine wichtige Anforderung an die zu entwickelnden Mörtel ist eine gute Haftung auf dem Untergrund. Durch Zugabe von Kd P kann eine deutliche Verbesserung der Haftzugfestigkeiten bezüglich der Mörtel-Nullproben erreicht werden, siehe Bild 23. Die höchsten Haftzugfestigkeiten wurden bei den Mörteln H15 und H14 mit etwa 1 N/mm^2 gemessen. Keinen deutlich positiven Einfluß auf die Haftzugfestigkeiten gegenüber den Nullproben bewirkt die Zugabe von MC. Bei den Kombinationen mit Kd P setzt sie die Haftzugfestigkeit gegenüber den Mörteln, die nur Kd P enthalten, sogar herab. Dies deckt sich nicht mit den Ergebnissen von MEHLMANN 1984.

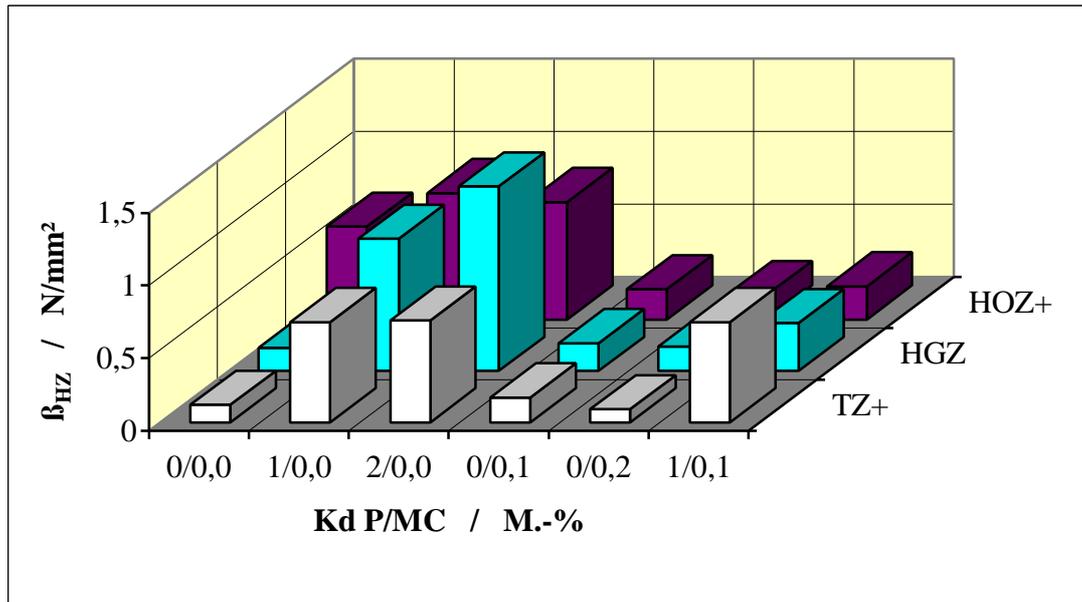


Bild 23: Einfluß von Bindemitteln und Zusatzmitteln auf die Haftzugfestigkeit (β_{HZ}) der Haftmörtel im Alter von 28 Tagen

Abschließend kann festgestellt werden, daß bei Einsatz geeigneter Mörtel die Anforderungen von SCHUBERT 1990 bezüglich der Haftzugfestigkeit, des E-Moduls und der Druckfestigkeit β_D (Putz) $\leq \beta_D$ (Haftmörtel) $\leq \beta_D$ (Putzuntergrund) erfüllt sind.

5.5.3.2 Hygrische Eigenschaften

Hygrische Dehnung

Die Ergebnisse des 1. Schwindens (ϵ_{s1}), des Quellens (ϵ_q) und des 2. Schwindens (ϵ_{s2}) sind in Tabelle A20 in Anhang zusammengestellt. Die Bindemittelart bestimmt maßgeblich das 1. Schwinden der Haftmörtel; es herrscht folgende Abstufung $TZ_{++} < HGZ < HOZ_{+}$. Der Einfluß der Bindemittel auf das 1. Schwinden ist größer als das der Zusatzmittel. In der Regel gehen erhöhte Anteile an Zusatzmitteln mit erhöhtem 1. Schwinden einher, siehe Bild 24.

Das Quellen und das 2. Schwinden der Haftmörtel werden sowohl von den Bindemitteln als auch von den Zusatzmitteln beeinflusst. So sind beim Quellen die folgenden Abhängigkeiten der unmodifizierten Haftmörtel vom Bindemittel $HGZ < HOZ_{+} < TZ_{++}$ und beim 2. Schwinden $HOZ_{+} = TZ_{++} < HGZ$ erkennbar.

Die Zusatzmittel führen in der Regel zu deutlichen Erhöhungen der gemessenen Dehnungen, die gegenüber Kalkmörteln erhöht sind (HOFFMANN 1992, BÖTTGER 1994, BOENKENDORF 1995). Da die Dehnungen der Haftmörtel maximal ca. 0,2 mm/m höher als bei Kalkmörteln sind, kann davon ausgegangen werden, daß sie materialverträglich sind.

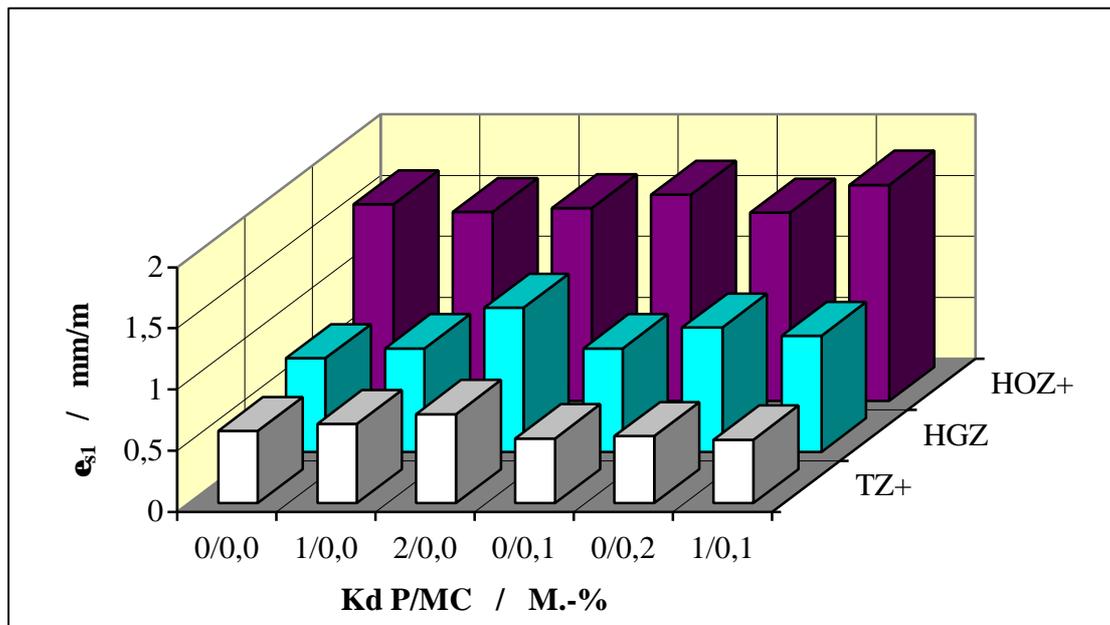


Bild 24: Einfluß der Bindemittel und Zusatzmittel auf das 1. Schwinden (ϵ_{s1}) der Haftmörtel im Alter von 28 Tagen

Wasseraufnahmekoeffizient (ω)

In Tabelle A22 im Anhang und Bild 25 sind die Wasseraufnahmekoeffizienten (ω) der Mörtelproben aufgeführt.

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Mörtel-Nullproben ist stets am höchsten und abhängig vom Bindemittel; so ist ω von TZ++ > HGZ > HOZ+. Die Verwendung von Zusatzmitteln reduziert das kapillare Saugen der Mörtel stark. Einerseits liegt dies an der Eigenschaft der Zusatzmittel, Luftporen in den Mörtel einzutragen. Sie unterbrechen die Kapillarporen, bewirken so eine geringere Wasseraufnahme und reduzieren die Festmörtelrohichte, vergleiche Tabelle A22 im Anhang. Andererseits kann auch ein hydrophober Einfluß der Zusätze (Kd P) beteiligt sein. Mit steigendem Anteil an Zusatzmitteln wird dieser Effekt verstärkt. Die niedrigsten ω -Werte sind bei den Mörteln mit dem höchsten Anteil an Kunststoffdispersion festzustellen. Die MC bewirkt bei gemeinsamem Einsatz der verwendeten Zusatzmittel eine leichte Erhöhung des kapillaren Saugens (Ausnahme HGZ).

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Mörtel auf Basis HGZ und HOZ+ sind kleiner als die von Kalkmörteln ohne Luftporen (BÖTTGER 1994 und BOENKENDORF 1995), aber vergleichbar mit historischen Kalkmörteln mit Luftporen, vergleiche Tabelle A12 im Anhang Proben PL3 und PL6.

Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ)

In Tabelle A22 im Anhang und Bild 26 sind die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen (μ) der untersuchten Mörtel angegeben. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen der untersuchten Mörtel (μ -Werte zwischen 7-18) liegen im Be-

reich von Kalkmörteln (μ -Werte zwischen 10-32) (Tabelle A12 im Anhang, VAN BAALEN 1991, BÖTTGER 1993c und BÖTTGER 1994).

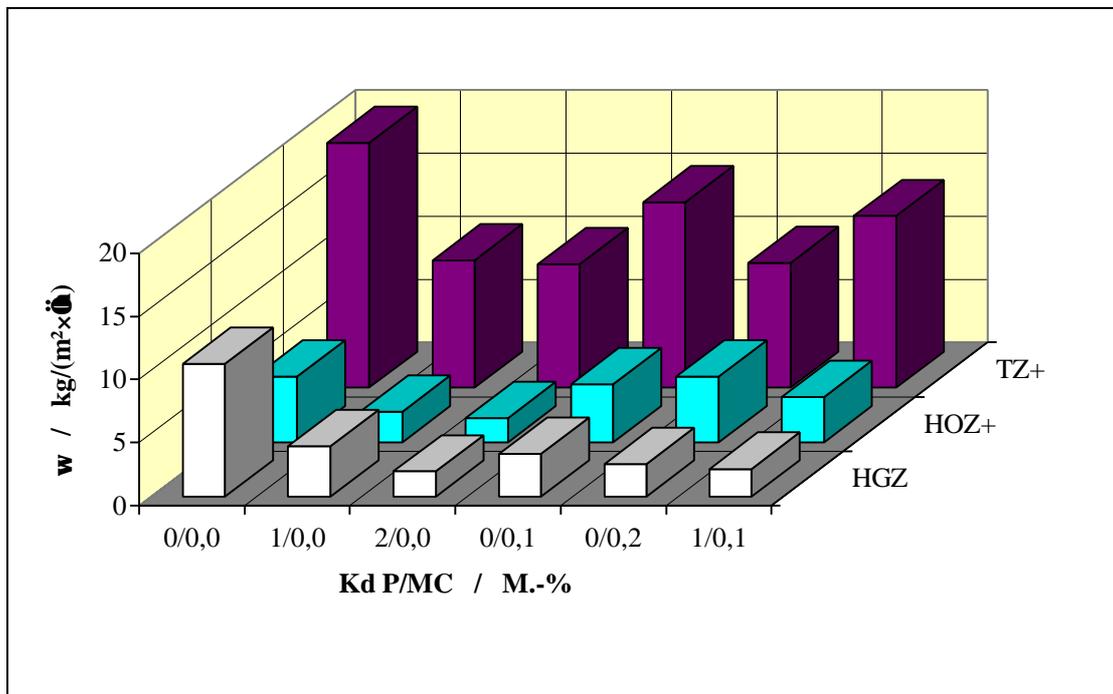


Bild 25: Einfluß der Bindemittel und Zusatzmittel auf die Wasseraufnahmekoeffizienten (w) der Haftmörtel im Alter von 28 Tagen

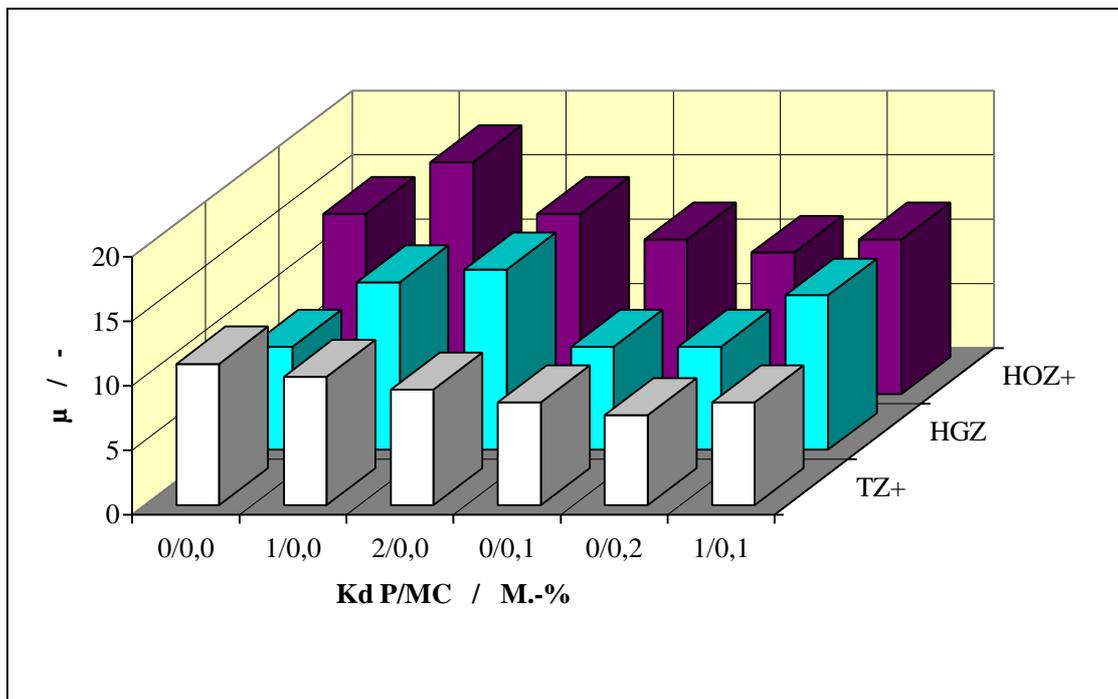


Bild 26: Einfluß der Bindemittel und Zusatzmittel auf die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen (μ) der Haftmörtel

Die μ -Werte der Haftmörtel ohne Zusatzmittel sind abhängig vom Bindemittel und bei $TZ_{++} < HGZ < HOZ_{+}$. Die beiden Zusatzmittel beeinflussen die Wasserdampf-Diffusion unterschiedlich. Der Einsatz von MC senkt die μ -Werte, während Kd P sie geringfügig erhöht. Die Mörtel erfüllen die Ansprüche des Anforderungsprofils.

5.5.3.3 Ausblühverhalten

Bei der Prüfung des Ausblühverhaltens der Haftmörtel über 20 Zyklen traten bei neun der untersuchten Mörtel geringe Ausblühungen auf, siehe Tabelle A22 im Anhang. Die ersten Ausblühungen konnten bei den TZ_{++} -Mörteln bereits nach drei, bei HGZ und HOZ_{+} nach neun Zyklen beobachtet werden. Die Ausblühungen können entstehen, wenn infolge Wassertransports wasserlösliche Verbindungen wie z. B. Gips und Calciumhydroxid an die Oberfläche gelangen. Sie bleiben nach der Verdunstung des Wassers auf der Mörteloberfläche zurück und reagieren mit der Luft (z. B. Portlandit zu Calcit). Die Ausblühungen konnten mittels Röntgendiffraktometrie als Gips und Calcit identifiziert werden, welche überwiegend bei Mörteln ohne Zusatzmittel bzw. bei erhöhten Zusatzmittelgehalten auftraten.

5.5.3.4 Frost-Tauwechsel-Widerstand

Der Widerstand gegen Frost-Tauwechsel wurde über 15 Zyklen hinweg bestimmt. Die Mörtel gelangten wassergesättigt in den Prüfzyklus. Die Ergebnisse sind in Tabelle A22 im Anhang dargestellt. Der FTW der Proben ohne Zusatzmittel ist schlecht, denn bei allen traten Absplitterungen und Rißbildungen auf. Alle Nullproben erfüllen deshalb die Anforderungen von KNÖFEL 1993¹⁰⁴ für Frost-Tauwechsel-Widerstand nicht. Die Zugabe von Kd P, aber insbesondere die von MC, verbessert den FTW so weit, daß keine Absplitterungen oder Rißbildungen zu verzeichnen sind. Die deutlichste Verbesserung wird jedoch beim kombinierten Einsatz von Kd P und MC erreicht. Aufgrund dieser Ergebnisse empfiehlt sich bei Anwendung der Haftmörtel in frostgefährdeten Bereichen der zusätzliche Einsatz von Mikrohohlkugeln (MHK). Sie sollen den Frost-Tauwechsel-Widerstand verbessern.

¹⁰⁴ KNÖFEL 1993: S. 88

5.5.3.5 Applikation der Haftmörtel an Musterflächen

Mit den zwei Haftmörteln H6 und H18 wurden in Verbindung mit Hinterfüllmörteln auf Basis desselben Bindemittels Musterflächen an verschiedenen Bauwerken angelegt, z. B. am ehemaligen Zisterzienserkloster Heydau, der Einhardbasilika und dem Schloß Schwerin (Terrakotta). Die Mörtel haben die abdichtende Aufgabe gut erfüllt und ließen sich ohne die Altsubstanz zu schädigen abnehmen. Bei dickerem Auftrag waren nach länger Verweildauer vor Ort Schwindrisse erkennbar. Der Verbund mit der historischen Substanz, an Proben des Schweriner Schlosses von der MPA Bremen untersucht, war einwandfrei.

5.6 Zusammenfassung zu Kapitel 5

Ziel der Entwicklung von Haftmörteln war einerseits die Herstellung von Mörteln, die zur vorbereitenden Abdichtung von Putzen vor dem Einbringen von Hinterfüllmörteln dienen sollen. Nach dem Einsatz sollen sie sich, falls erforderlich, einfach und möglichst ohne die Altsubstanz zu schädigen, wieder entfernen lassen (Spatel, Skalpell). Andererseits ist ihr Einsatz beim Anheften loser Putzpartien geplant. Sie sollten, neben einem hohen Sulfatwiderstand und ausreichend hohen Haftzugfestigkeiten, hygri-sche Eigenschaften (Wasseraufnahme und Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ) und E-Moduln aufweisen, die in der Abfolge Putzgrund, Haftmörtel und historischer Kalkputz nicht störend wirken.

In Vorversuchen wurden 6 unterschiedliche Bindemittelkombinationen auf ihren Sulfatwiderstand sowie ihre mechanischen Eigenschaften und hygri-sche Dehnung hin geprüft. Die drei geeignetsten Bindemittelkombinationen auf Basis Tonerdezement mit Zusatz von Kalksteinmehl (KStM) und Hüttensand (HüS) - (TZ++), Hochofenzement mit Zusatz von KStM - (HOZ+) und sulfatisch angeregter Hochofenschlacke - (HGZ) wurden in Hauptversuchen optimiert.

Auf Basis dieser 3 Bindemittel wurden insgesamt 18 Mörtel durch Variation von Zusatzmitteln wie Methylhydroxyethylcellulose (MC) und Kunststoffdispersionspulver (Kd P) konzipiert. Bei Mörteln mit den Bindemitteln HOZ+ und HGZ wurde zudem das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis gegenüber den Vorversuchen von 1:3 auf 1:4 erniedrigt.

Die drei Bindemittel haben unterschiedliche Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften. Die Festigkeitsentwicklung der Haftmörtel ist abhängig vom Bindemittel und folgt der Beziehung $HOZ+ > HGZ > TZ++$.

Einen günstigen Einfluß üben die Zusatzmittel hinsichtlich des Verformungsverhaltens der Mörtel aus. Steigenden Gehalten von Kd P und MC folgen niedrigere E-Moduln, begleitet von einer erwünschten Abnahme der Druck- und Biegezugfestigkeiten. Die Zusatzmittel erniedrigen durch Eintrag von Luftporen die Wasseraufnahme. Sie liegt deutlich niedriger als die vergleichbarer historischer Mörtel ohne Luftporen, aber im Bereich von historischen Kalkputzen (Torhalle Lorsch) mit Luftporen. Gleichzeitig weisen die untersuchten Haftmörtel im Vergleich zu Kalkmörteln eher günstigere Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen (μ) auf.

Kd P verbessert die Haftzugfestigkeiten aller Mörtel stark, während MC diese z. T. reduziert. Bei kombiniertem Einsatz von Kd P und MC sind ausreichend hohe Haftzugfestigkeiten ($> 0,2 \text{ N/mm}^2$) erzielbar. Ausreichender Frost-Tauwechsel-Widerstand ist nur bei Zugabe von Zusatzmitteln gewährleistet, insbesondere bei der Kombination MC - Kd P. Die Haftmörtel mit Zusatz von 1 M.-% Kd P und 0,1 M.-% MC (H6 und H18) genügen den Ansprüchen des Anforderungsprofiles.

Damit können zusammenfassend die Mischungen H6 und H18 für den geplanten Einsatz als Haftmörtel empfohlen werden. Sie erfüllen alle Eigenschaftskennwerte des Anforderungsprofiles. Sie haben sich zudem bei Musterflächen z. B. am ehemaligen Zisterzienserkloster in Heydau bewährt.

6 Entwicklung von Hinterfüllmörteln für die Restaurierung historischer Kalkputze

6.1 Einleitung

Zum Erhalt historischer Putzsubstanz sollen anorganische Hinterfüllmörtel mit einem hohen Sulfatwiderstand entwickelt werden, da die historischen Putze durch Umwelteinflüsse z. T. stark sulfatisiert sind. Hinterfüllmörtel sind Mörtel mit Feinzuschlägen, die speziell für die Wiederbefestigung hohlliegender Putzbereiche entwickelt werden sollen. Sie werden anders als Injektionsmörtel drucklos mit Spritzen und Kanülen in Hohlstellen verbracht (LEHMKUL 1994, SCHOSTAK 1995). Bei der Applikation kann nur drucklos gearbeitet werden, da andernfalls der Putz vom Untergrund weggedrückt würde. Dies bedingt höhere W/B-Werte und andere Arbeitstechniken, Beispiele nennen HARTLEITNER 1990 und SCHOSTAK 1995.

Von den in der Denkmalpflege eingesetzten Hinterfüllmörtel und -massen sind Rezepte bekannt, häufig werden Systeme auf Basis Kieselsäureester oder mineralischer Bindemittel eingesetzt („Limburger Material“ oder Ledan), jedoch ist wenig darüber veröffentlicht. Erst in neueren Untersuchungen von LAMBRECHT 1990 und LEHMKUHL 1990 werden umfangreich die technologischen und hygrischen Eigenschaften von Hinterfüllmörtel auf Basis Kieselsäureester untersucht.

Zu mineralischen Systemen existieren bislang nur wenige Untersuchungen. Die Eigenschaften von Ledan werden von MASSARI 1985, Ettl 1992 und Ettl 1994 geprüft. BÖTTGER 1993b und BÖTTGER 1993d beschreibt die Entwicklung hochsulfatwiderstandsfähiger und SCHOSTAK 1995 die Entwicklung von Hinterfüllmörteln auf Basis Sumpfkalkhydrat. Alle Autoren befassen sich im wesentlichen mit der Applikation und den mechanischen Eigenschaften wie E-Modul, Druckfestigkeit, Biegezug- und Haftzugfestigkeit, lediglich BÖTTGER 1993d führt einige Untersuchungen zu hygrischen Eigenschaften an.

Für die Hinterfüllmörtel ist gutes Fließverhalten der Mörtel nicht die wichtigste Eigenschaft, sondern vielmehr ihr Penetrationsverhalten. Dies ist wichtig, um feine Risse und hohlliegende Putzbereiche sicher zu verfüllen. Zudem sollen sie an Kalkputzmörtel angepaßte Eigenschaften aufweisen, begleitet von möglichst hohen Haftzugfestigkeiten.

Historische Kalkputze sind z. T. von einem netzförmigen Rißsystem durchzogen, wittern ab und liegen partienweise hohl. Die Hinterfüllmörtel sollen also:

- Hohlräume gut penetrieren,
- gut an den verschiedenen Putzuntergründen haften,
- an Kalkmörtel angepaßte mechanische Eigenschaften aufweisen, also niedrige Festigkeiten und E-Moduln aufweisen.

Eine gute Abstimmung der Mörtel Eigenschaften der Hinterfüllmörtel an die Eigenschaften der historischen Mörtel ist für einen dauerhaften Verbund wichtig. Die An-

passung der Eigenschaften der Hinterfüllmörtel soll anhand der in Teil I dieser Arbeit ermittelten technologischen und hygrischen Eigenschaften der historischen Kalkputze erfolgen.

Die Entwicklung dieser Mörtel erfolgte in mehreren Schritten. Zur Auswahl der geeigneten Bindemittel wurde in Vorversuchen des Kapitels 5 dieser Arbeit zunächst der Sulfatwiderstand geprüft. Die hoch sulfatwiderstandsfähigen Mörtelzusammensetzungen sollten durch verschiedene gezielte Veränderungen der Mörtelzusammensetzungen optimiert werden.

Im ersten Schritt (Vorversuche) sollte die Eignung verschiedener Bindemittel als Hinterfüllmörtel geprüft und in einem zweiten Schritt (Hauptversuche) die besten Mörtel der Vorversuche optimiert werden. Die Frischmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel waren stets vorher zu verbessern.

Im Rahmen der Vorversuche sollten nach Abschluß der Untersuchungen geeignete Hinterfüllmörtel an Musterflächen appliziert werden. Dabei kamen die Mörtel mit verschiedenen Materialien in Kontakt. Dies reichte von Naturstein über Lehm bis hin zu Gipsputzen. 12 Monate nach der Applikation sollte die Haftung der Mörtel sowie der Mineralbestand geprüft werden.

6.2 Anforderungsprofil an Hinterfüllmörtel

Der Einsatz der Hinterfüllmörtel, wie in der Einleitung beschrieben, stellt hohe Anforderungen an einen dauerhaften Verbund. Um dies zu gewährleisten, sollte das Anforderungsprofil, welches sich an den Eigenschaften der historischen Kalkmörtel, siehe Teil I, Kapitel 4, und der Putzregel orientiert erfüllt werden. Hinterfüllmörtel für die genannten Bauwerke sollen folgende Kennwerte aufweisen:

- gute Penetrationseigenschaften
- Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ} > 0,2 \text{ N/mm}^2$
- Druckfestigkeit $\beta_D > 2$ und $< 15 \text{ N/mm}^2$
- E-Modul $E_{dyn} < 10000 \text{ N/mm}^2$
- Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ -Wert $< 20^{105}$
- Wasseraufnahmekoeffizient $\omega < \text{historische Kalkmörtel ca. } 0,5\text{-}10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$
- Wasserabgabekoeffizient $w_{ak} \geq \text{historische Kalkmörtel ca. } 0,1\text{-}0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
- geringe hygrische Dehnungen
- hoher Sulfatwiderstand, da der historische Bestand durch Umwelteinflüsse und ggf. vorhandene Sulfate belastet ist
- geringe Ausblühneigung
- hoher Frost-Tauwechsel-Widerstand FTW

¹⁰⁵ Nach Untersuchungen von METZ 1992, S. 38 liegen die μ -Werte üblicher Sandsteinuntergründe zwischen 30 und 700, weshalb in der Abfolge Putzgrund - Hinterfüllmörtel - Kalkputz ein μ -Wert von 50 eine genügend hohe Dampfdurchlässigkeit bedeutet. Im Verbund Kalkputz - Hinterfüllmörtel - Kalkputz sollten mit historischen Kalkmörteln vergleichbare μ -Werte (10 - 40) angestrebt werden. Sie sind durch Untersuchungen jeweils nachzuweisen.

6.3 Verwendete Materialien

6.3.1 Bindemittel

Bei der Entwicklung der Hinterfüllmörtel kamen die folgenden Bindemittel und Zusätze im Rahmen der Vor- und Hauptuntersuchungen zum Einsatz:

HGZ aus: 83 M.-% **HüS** Hüttensand
 10 M.-% **Gips** gemahlener Naturgips
 7 M.-% **PZ** CEM I 42,5 R HS/NA

HOZ CEM III/B 32,5 HS/NW/NA

KStM Kalksteinmehl

Mikro hochfeiner gesichteter Hochofenzement

Die chemischen Analysen, die Sieblinien der Bindemittel und Zusätze sowie die spez. Oberflächen der Bindemittel sind den Tabellen A14 und A15 im Anhang zu entnehmen.

6.3.2 Zuschlag

Als Zuschlag für die Hinterfüllmörtel wurde verwendet:

SP10 Quarzmehl SP 10, zu 97 M.-% kleiner 90 µm

Chemische Analysen und Sieblinien sind in den Tabellen A14 und A15 im Anhang aufgeführt.

6.3.3 Zusätze

Folgende Zusätze kamen bei der Entwicklung der Hinterfüllmörtel zum Einsatz:

BVK Borosilikat-Vollglaskugeln

Em Emulgator WNS, Arylpolyglykoether

FM Verflüssiger FMF-Konzentrat (pulverförmig) auf Melaminharzbasis

HGK Borosilikat-Hohlglaskugeln

Kd L flüssige Kunststoffdispersion (copolymerer Styrol/Acrylat-Dispersion) mit 50 M.-% Feststoffanteil. Zugabemengen beziehen sich immer auf den Feststoffgehalt der Kunststoffdispersion.

Kd P Kunststoffredispersionspulver (Copolymerisat-Pulver aus Vinylacetat und dem Vinylester einer langkettigen, verzweigten Carbonsäure)

MC Methylhydroxyethylcellulose

PUR lösemittelfreies, flüssiges, in Wasser emulgierbares aliphatisches Polyisocyanat. Im weiteren angegebene PUR-Gehalte beinhalten stets die Verwendung von 4 M.-% Em, bezogen auf das PUR.

ST Stabilisator ST 1, pulverförmiges Produkt, enthält Polyethylenoxid

Chemische Analysen und Sieblinien der BVK und HGK sind in den Tabellen A14 und A15 im Anhang aufgeführt. Sie sollen als Zusatz das Fließ- und Penetrationsverhalten der Hinterfüllmörtel durch ihre Kugelform günstig beeinflussen. Ihr hoher chemischer

Widerstand, wie ihr niedriger Alkaligehalt (Na_2O , K_2O) im Vergleich zu Natronglas-kugeln war ausschlaggebend für ihren Einsatz.

Die Auswirkungen von MC und Kd P wurden in Kapitel 5.3.3 beschrieben.

Wie Kd P soll Kd L die E-Moduln senken und Haftzugfestigkeit der Hinterfüllmörtel verbessern.

Die Verwendung von FM sollte den Wasserbedarf reduzieren, um Mörtel mit ausreichend hohem Penetrationsverhalten bei nicht zu hohem W/B zu erhalten. Bestandteile üblicher Fließmittel sind Melaminharze oder Naphtalinsulfonsäurederivate.

ST soll nach Auskunft des Herstellers die Stabilität eines Zementleimes verbessern und die Neigung von Zementsuspensionen zum Sedimentieren verringern.

Der Zusatz von PUR soll das 1. Schwinden der Hinterfüllmörtel verringern. Bei dem Umsatz von Isocyanaten wird CO_2 (Gleichung (28)) freigesetzt, was nach BÖTTGER 1991 in Mörteln zu Volumenzunahmen führen kann.



Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte aliphatische Polyisocyanat stammt aus der Lackherstellung und dient als Vernetzter für wäßrige Polymerdispersionen (Polyurethan-, Polyvinylacetat-, Polyacrylatdispersionen). Es soll nach Angaben des Herstellers langsam reagieren und deshalb das CO_2 langsam freisetzen. In Vorversuchen konnte durch Verwendung von PUR das 1. Schwinden von Hinterfüllmörteln erheblich reduziert werden.

Zur besseren Emulgierbarkeit des PUR muß dem Wasser Em zugegeben werden. Der Mengenanteil sollte nach Angaben des Herstellers immer 4 M.-% der eingesetzten PUR-Menge sein.

6.3.4 Untersuchungsmethoden

Folgende Frisch- und Festmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel wurden geprüft:

Frischmörteluntersuchungen:

- Penetrationsverhalten, siehe Kapitel 3.2.4, Seite 50
- Sedimentationsverhalten, siehe Kapitel 3.2.5, Seite 51
- Fließverhalten, siehe Kapitel 3.2.3, Seite 50
- Ausbreitmaß, siehe Kapitel 3.2.1, Seite 50
- Wasserrückhaltevermögen, siehe Kapitel 3.2.2, Seite 50

Festmörteluntersuchungen:

- hygrische Dehnung: 1. Schwinden, Quellen, 2. Schwinden, siehe Kapitel 3.3.2.2, Seite 54
- Biegezug- und Druckfestigkeit, siehe Kapitel 3.3.1.2 und 3.3.1.3, Seite 52
- Haftzugfestigkeit, siehe Kapitel 3.3.1.4, Seite 52

- Haftzugfestigkeiten vor Ort, 12 Monate nach der Applikation (ausgewählte Mörtel der Vorversuche)
- dynamischer Elastizitätsmodul, siehe Kapitel 3.3.1.1, Seite 52
- Ausblühverhalten, siehe Kapitel 3.3.3, Seite 59
- Wasseraufnahmegrad, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56
- Wasseraufnahmekoeffizient, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56
- Wasserdampf-Diffusion, Naßverfahren, siehe Kapitel 3.3.2.3, Seite 54
- Wasserabgabegrad, siehe Kapitel 3.3.2.7, Seite 56
- Austrocknungsverhalten, siehe Kapitel 3.3.2.7, Seite 56
- innere Oberfläche, siehe Kapitel 3.3.2.5, Seite 55
- Frost-Tauwechsel-Widerstand, siehe Kapitel 3.3.1.6, Seite 53
- Sorptionsfeuchte und Sorptionsdehnungen, siehe Kapitel 3.3.2.4, Seite 55
- Gesamtporosität und Porenradienverteilung, siehe Kapitel 3.3.5, Seite 59
- Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalyse, siehe Kapitel 3.4.4, Seite 62
- mikroskopische Untersuchungen, siehe Kapitel 3.4.5, Seite 62
- Wärmedehnungskoeffizient, siehe Kapitel 3.3.6, Seite 60

6.4 Untersuchungsergebnisse der Voruntersuchungen

6.4.1 Zusammensetzung der Hinterfüllmörtel der Vorversuche

In Tabelle A23 im Anhang sind die Mischungsverhältnisse der 8 verschiedenen Mörtel der Voruntersuchungen angegeben, die aus 4 verschiedenen Bindemittelmischungen hergestellt wurden. Die Bindemittel wiesen folgende Zusammensetzungen auf:

- **HOZ+** bestehend aus 70 M.-% HOZ und 30 M.-% KStM
- **TZ+** bestehend aus 70 M.-% TZ und 30 M.-% KStM
- **TZ++** bestehend aus 33,3 M.-% TZ, 33,3 M.-% HüS und 33,3 M.-% KStM
- **HGZ** bestehend aus 83 M.-% HüS, 10 M.-% Gips und 7 M.-% PZ

Die Hinterfüllmörtel der Vorserie enthielten Zusätze wie in Tabelle A23 im Anhang angegeben und Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse von 1:1. Die Mörtel wurden mit entsprechender Zusammensetzung eine Stunde im Turbula-Mischer, System Schatz, homogenisiert. Der Sulfatwiderstand der verwendeten Bindemittel wurde in Kapitel 5.4.3.3, Seite 94 geprüft.

Die Zusätze, deren Zugabemengen sich z. T. auf Vorversuche nach dem „trial and error-Verfahren“¹⁰⁶ stützt, auf die hier nicht näher eingegangen wird, sollen folgende Einflüsse auf die Eigenschaften der Hinterfüllmörtel nehmen:

- FM, ST und Borosilikat-Vollglaskugeln (BVK): Verbesserung des Penetrationsverhaltens. Der Gehalt an BVK variierte; so enthielten VHOZ1, VHOZ2, VHGX1 und VHGX2 5 M.-% und VTZ1 - VTZ2 2,5 M.-%
- PUR: Verminderung des 1. Schwindens

¹⁰⁶ Dabei wird stichprobenartig versucht, geeignete Mischungen zu finden. Erfolgversprechende Mischungen werden weiter optimiert, andere nicht weiter verfolgt.

- KD L: Erhöhung der Haftzugfestigkeit, dabei enthielt Hinterfüllmörtel VHOZ1 die doppelte Menge an KD L im Vergleich zu den restlichen Mörteln
- MC: Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens. Die Zugabe erfolgte in zwei Stufen; 0 und 0,1 M.-%

Bei den Mörteln der Vorversuche sollte der Einfluß der Zugabe unterschiedlicher Mengen MC (0 und 0,1 M.-%) und dem kombinierten Einsatz von Kd L und MC untersucht werden. HOZ-Mörtel enthielten stets MC, da deren WRV bei den Haftmörteln am schlechtesten war.

6.4.2 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper, Anlage von Musterflächen

Die Herstellung und Lagerung der Normprismen erfolgte abweichend von DIN 1164 wie folgt: Zwei Kalksandsteine, gemäß DGfM 1992, mit einem Feuchtegehalt von 4-6 M.-%, wurden nebeneinander gelegt, eine Filterplatte (DIN 18 555, Teil 7) und ein Faservlies darübergelegt und darauf die Normprismenform ohne Boden gestellt. Die Prismenformen wurden mittels Schraubzwingen zusammengehalten und die undichten Stellen mit Paraffin abgedichtet. Die Hinterfüllmörtel wurden in diese Formen gegossen. Durch diese Vorgehensweise sollte, wie in der Praxis, dem Hinterfüllmörtel Wasser entzogen werden. Dieser Wasserentzug erniedrigt den Wasser/Bindemittel-Wert und beeinflusst damit die Mörtel Eigenschaften. Das Verfahren ist nur eine Annäherung an die Praxis, da dort der Wasserentzug von mehr als einer Seite erfolgt und die Dicke der Mörtelschicht in der Regel deutlich geringer ist. Die Lagerung der Normprismen erfolgte im Normklima DIN 50014-23/50-2.

Zur Herstellung der Mörtel - Verbundkörper wurden sandgestrahlte Beton-Gehwegplatten der Maße 30x30x5 cm verwendet. Die Herstellung erfolgte in Anlehnung an DIN 18 555, Teil 6. Die Gehwegplatten wurden ohne vorherige Befeuchtung der Oberfläche mit dem Hinterfüllmörtel aufgebracht. Die hergestellten Verbundkörper lagerten ohne Abdeckung bis zum Prüftermin (28 Tage) im Normklima DIN 50014-23/50-2.

An der Südfassade und im Innenbereich des Klosters Heydau wurden in Zusammenarbeit mit Restauratoren Musterflächen mit den zwei geeignetsten Mörteln der Vorversuche angelegt. Nach vorhergehender intensiver Befeuchtung der Musterflächen erfolgte die Hinterfüllung der Mörtel. Sie wurde diskontinuierlich mit Injektionsspritzen aus der Veterinärmedizin durchgeführt. Die Musterflächen wurden 5 Tage abgehängt. Die Wetterbedingungen während der Applikation und der Nachbehandlung: heiter bis bewölkt, Temperaturen 10 bis 23 °C (Nacht/Tag).

Dabei wurden die Hinterfüllmörtel in den gestörten Verbund folgender Materialien appliziert:

- Kalkputz auf Sandstein
- Kalkputz auf Lehm
- Gipsputz auf Kalkputz
- Gipsputz auf Sandstein

6.4.3 Frischmörteluntersuchungen

6.4.3.1 Optimierung der Frischmörteleigenschaften

Die in Tabelle A23 im Anhang angegebenen Zugabemengen und Verhältnisse zwischen FM und ST gründeten sich auf Optimierungsversuche, in denen die Frischmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel gezielt verbessert wurden. Zur Ermittlung der einzusetzenden Mengen an Verflüssiger und Stabilisator im Rahmen der Vorversuche fanden zunächst Optimierungen der Frischmörteleigenschaften an Hinterfüllmörteln auf Basis HGZ statt. Die Gehalte beider Zusatzmittel variierten, wie in der Tabelle A24 im Anhang dargestellt. Bei den Versuchen wurden die beiden Zusatzmittel in sechs verschiedenen Mengenanteilen und vier unterschiedlichen Verhältnissen zueinander eingesetzt:

- FM/ST 1:3; 1:2; 3:1 und 2:1

Dabei war das Fließverhalten der Hinterfüllmörtel ohne Zusatzmittel am besten. Die gemeinsame Zugabe von FM und ST erhöhte in jedem Fall die Auslaufzeit. Deutliche Verbesserungen gegenüber den Proben ohne Zusatzmittel wurden dagegen beim Penetrationsverhalten, der wichtigsten Eigenschaft erzielt. Dabei erwiesen sich Mengenverhältnisse von FM:ST wie 3:1 am günstigsten. Die Zusatzmittel verschlechterten in vielen Fällen das Sedimentationsverhalten. Als Optimum bezüglich Penetrationstiefe und Sedimentation erwiesen sich Zugabemengen von 0,3 M.-% FM und 0,1 M.-% Stabilisator. Stichprobenartige Versuche mit Hinterfüllmörteln auf Basis anderer Bindemittel führten zu vergleichbaren Ergebnissen.

6.4.3.2 Frischmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel der Vorversuche

Alle untersuchten Mörtel weisen ein gutes Penetrationsverhalten auf. Das zu penetrierende Sandbett von 12 cm Höhe in Reagenzgläsern wurde stets vollständig durchdrungen. Hierzu wurde der Wasser/Bindemittel-Wert solange variiert, bis dieses Ziel erreicht war. Der Wasseranspruch der Mörteln war deshalb unterschiedlich, siehe Tabelle A25 im Anhang, und bei $HGZ < HOZ+ < TZ+ = TZ++$.

Die Variation der Zusatzmittel wirkte sich differenziert auf die Frischmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel aus. Höhere Zugabemengen an Kd L (VHOZ1) verbes-

serten das Fließverhalten und die Sedimentationsneigung, ohne jedoch zu Wassereinsparungen zu führen. Keine Auswirkungen ergaben sich beim WRV.

Die Zugabe von MC verursachte einen höheren Wasseranspruch und verschlechterte das Fließverhalten. Verbessert wurden das WRV und das Sedimentationsverhalten. Dabei ist die deutlichste Verbesserung des WRV bei Hinterfüllmörteln mit den Bindemitteln TZ+ und TZ++ zu erkennen.

Stärkere Einflußnahme als die Zusätze MC und Kd L übten die Bindemittel auf die Frischmörteleigenschaften aus. So wurden die besten Frischmörteleigenschaften bei Hinterfüllmörteln auf Basis von HGZ erzielt und die schlechtesten auf der von TZ+.

6.4.4 Festmörteluntersuchungen

6.4.4.1 Hygrische Eigenschaften

Die Ergebnisse des Schrumpf-, Quell- und Schwindverhaltens sind in Tabelle A25 zusammengestellt. Je nach Bindemittelart ist ein unterschiedliches **1. Schwinden** der Mörtel zu beobachten, das nach 90 Tagen beendet ist. Die Hinterfüllmörtel weisen abhängig vom Bindemittel folgende Tendenz auf: $HGZ < TZ+ < HOZ+ < TZ++$. Der Einfluß des Bindemittels auf das 1. Schwinden ist größer als der der Zusatzmittel. Die Zugabe von MC, bzw. die Verdopplung der Kd führen zu einem stärkeren 1. Schwinden der Mörtel. Gegenüber den Haftmörteln verursacht der PUR-Zusatz ein vergleichbares 1. Schwinden trotz höherem Bindemittelanteil und höherem W/B-Wert der Hinterfüllmörtel.

Das **Quellen** der Hinterfüllmörtel ist nach 10 Tagen beendet. Es ist abhängig vom Bindemittel und bei $HGZ < HOZ \ll TZ++ < TZ+$. Die MC verursacht ein stärkeres Quellen der Mörtel. Die Verdopplung des Kunststoffanteils (VHOZ1) erhöht es geringfügig.

Das **2. Schwinden** der Mörtel ist nach 54 Tagen Lagerung beendet. Die Länge des 2. Schwindens spricht dafür, daß die Hydratation der Hinterfüllmörtel durch die Wasserlagerung noch einmal in Gang kommt. Das 2. Schwinden läßt folgende Tendenzen abhängig vom Bindemittel erkennen $HGZ \ll HOZ \ll TZ+ < TZ++$. MC und die Verdopplung des Kd L-Gehaltes (VHOZ1) verschlechtern das 2. Schwinden geringfügig.

6.4.4.2 Mechanische Eigenschaften

In Tabelle A26 im Anhang sind die Ergebnisse der E-Modulprüfung, der Biegezug-, Druck- und Haftzugfestigkeitsuntersuchungen nach 7 und 28 Tagen Lagerungsdauer angegeben.

Die **E-Moduln** (E_{dyn}) der untersuchten Hinterfüllmörtel erwiesen sich als recht unterschiedlich. In der Regel war mit zunehmender Lagerungsdauer, d. h. fortschreitender Hydratation, erwartungsgemäß eine geringfügige Zunahme der E-Moduln zu beobachten. Sowohl der Einsatz von MC als auch die doppelte Zugabemenge an Kd bei den HOZ-Mörteln erniedrigten die E-Moduln der Mörtel. Die E_{dyn} waren mit Ausnahme der Hinterfüllmörtel auf TZ-Basis relativ hoch ($> 10000 \text{ N/mm}^2$), aber im Hinblick auf den geplanten Einsatz im Verbund zwischen Putzuntergrund und Kalkputz noch tolerierbar. Der Anstieg des E-Moduls mit zunehmender Hydratationsdauer war beim HGZ-Mörtel am höchsten und beim TZ-Mörtel am geringsten. Es ist jedoch bekannt, daß der E-Modul wie auch die Festigkeit der Mörtel auf Basis HGZ bei der Carbonatisierung wieder abfällt (WESCHE 1966, TRAUTMANN 1992). Die E-Moduln folgten abhängig vom Bindemittel der Beziehung $\text{HGZ} > \text{HOZ} > \text{TZ+} > \text{TZ++}$. Die Zusatzmittel, MC bzw. die doppelte Menge Kd L, erniedrigten den E-Modul geringfügig.

Die **Biegezug-** und **Druckfestigkeiten** der Hinterfüllmörtel zeigten gleiche Tendenzen, wobei ein deutlicher Zusammenhang zwischen β_D und E_{dyn} festzustellen ist. Die Mörtel mit den höchsten E-Moduln zeigten erwartungsgemäß auch die höchsten Druckfestigkeiten. Der Einsatz von MC, bzw. erhöhten Kd-Zugabemengen führte zu einer Verringerung der Biegezug- und Druckfestigkeiten. Alle Druckfestigkeiten entsprachen dem Anforderungsprofil ($< 10 \text{ N/mm}^2$).

Eine wichtige Anforderung an die zu entwickelnden Hinterfüllmörtel war ein ausreichendes Haftvermögen auf dem Untergrund. Sie sollten nach Möglichkeit höhere oder vergleichbare **Haftzugfestigkeiten** im Vergleich zu Kalkputzen ($0,03\text{-}0,20 \text{ N/mm}^2$, BÖTTGER 1994, BOENKENDORF 1995) erreichen. Die Hinterfüllmörtel der Vorversuche erreichen dieses Ziel, liegen in den meisten Fällen aber unter den Ansprüchen des Anforderungsprofils. Abhängig vom Bindemittel ergibt sich folgende Tendenz $\text{HOZ} > \text{HGZ} > \text{TZ+} > \text{TZ++}$. Die MC beeinflusst die Haftzugfestigkeiten, wie auch schon bei den Haftmörteln, negativ, insbesondere beim TZ+-Mörtel.

Die am Kloster Heydau applizierten Hinterfüllmörtel wiesen nach 12 Monaten - im Vergleich zu den Laborergebnissen - vergleichbare (HGZ) oder höhere (HOZ+) Haftzugfestigkeiten auf (Tabelle A26 im Anhang). Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten ist möglicherweise im MC-Gehalt des HOZ-Hinterfüllmörtels zu suchen. Der eher negative Einfluß der MC auf die Laborergebnisse bestätigte sich unter Praxisbedingungen nicht.

Abschließend kann festgestellt werden, daß bei Einsatz dieser Mörtel die Anforderungen nach SCHUBERT 1990 bezüglich der Haftzugfestigkeit, des E-Moduls und der

Druckfestigkeit erfüllt sind. Die Anforderungen der Putzregel, angewendet auf diese Situation, $\beta_D(\text{Putz}) \leq \beta_D(\text{Hinterfüllmörtel}) \leq \beta_D(\text{Stein})$ sind erfüllt.

6.4.4.3 Ausblühverhalten

Das Ausblühverhalten der Mörtel wurde über 20 Zyklen hinweg an 28 Tagen alten Proben bestimmt. Dabei zeigten alle Mörtel, bis auf Mörtel VHGX2, ganz geringfügige Ausblühungen. Mörtel VHGX2 zeigte keine Ausblühungen, siehe Tabelle A27 im Anhang. Die ersten Ausblühungen traten in der Regel zwischen dem 9. und dem 12. Prüfzyklus auf und bestanden, nach Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie, überwiegend aus Calcit und untergeordnet aus Gips. Die Ursache für die Ausblühungen ist in den hydratisierten Bindemitteln zu suchen, die wasserlösliche Verbindungen wie Gips und Calciumhydroxid enthalten. Diese gelangen infolge des Wassertransports durch die Poren an die Oberfläche und kristallisieren bei der Verdunstung des Wassers aus.

6.4.4.4 Zusätzliche Prüfungen ausgewählter Hinterfüllmörtel

Die Hinterfüllmörtel, VHOZ2 und VHGX2 erschienen aufgrund der Untersuchungen geeignet, am ehemaligen Kloster Heydau versuchsweise an untergeordneten Flächen appliziert zu werden. An diesen beiden Mörteln fanden die Bestimmungen folgender Eigenschaften bzw. Kennwerte statt: **Frost-Tauwechsel-Widerstand**, **Wasseraufnahmekoeffizient** und **Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ** . Aufgrund der Ergebnisse (Tabelle A25 im Anhang) wird deutlich, daß der Hinterfüllmörtel auf Basis HGZ sehr gut an die Eigenschaften historischer Kalkmörtel, wie sie im Rahmen dieser Arbeit bestimmt wurden (Tabelle A12 im Anhang), angepaßt ist. Das Anforderungsprofil wird von den untersuchten hygrischen Eigenschaften beider Hinterfüllmörtel erfüllt, dabei erzielt der HOZ+-Mörtel höhere μ -Werte.

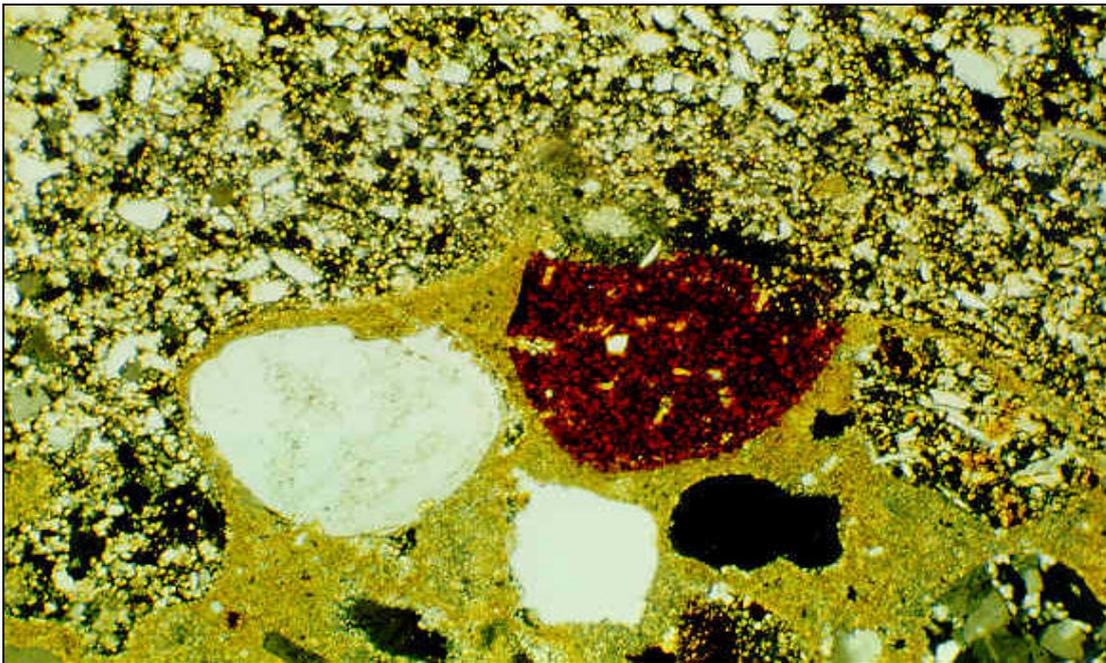
Der Widerstand gegen Frost-Tauwechsel ist hoch. Abweichend von KNÖFEL 1993¹⁰⁷ wurden nicht 15, sondern 50 Frost-Tauwechsel Zyklen durchgeführt. An den Proben konnten keine Schäden festgestellt werden.

¹⁰⁷ KNÖFEL 1993: S. 96 - 97, Abschnitt 1.3.2.2.4 A7M-Widerstand gegen Frost-Tauwechsel (FTW)

6.4.4.5 Prüfung des Verbundes der Hinterfüllmörtel an den Musterflächen

Die Beprobung der Musterflächen fand, wie schon beschrieben, 12 Monate nach der Applikation statt. Für die Untersuchungen wurden Bohrkerne mit 50 mm Durchmesser gezogen und an diesen der Verbund des Untergrundes mit den Hinterfüllmörteln und dem Putz untersucht. Dabei wurden auch kritische Bereiche mit Gipsmörteln erfaßt. Von diesen Bohrkernen wurden Proben für die Dünnschliff- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) präpariert.

Die lichtmikroskopischen (siehe exemplarisch Bild 27) und die REM-Untersuchungen (siehe exemplarisch Bild 28) zeigen einen guten Verbund der Hinterfüllmörtel mit allen Untergründen (Sandstein, Gips, Lehm) und dem Putz (Kalk, Gips). Selbst bei kritischen Mörteln wie Gips waren keine schädlichen Kristallneubildungen zu beobachten.



— 170 µm

Bild 27: Lichtmikroskopische Aufnahme des Verbundes des Mörtels VHGZ2. (obere Bildhälfte) mit Kalkputz. Im Hinterfüllmörtel ist Quarzzuschlag erkennbar; das Bindemittel ist hell bis dunkelgrau. Der Kalkmörtel enthält neben Bindemittel und Quarzzuschlag ein Ziegelbruchstück (rotbraun). Durchlicht, XPL.

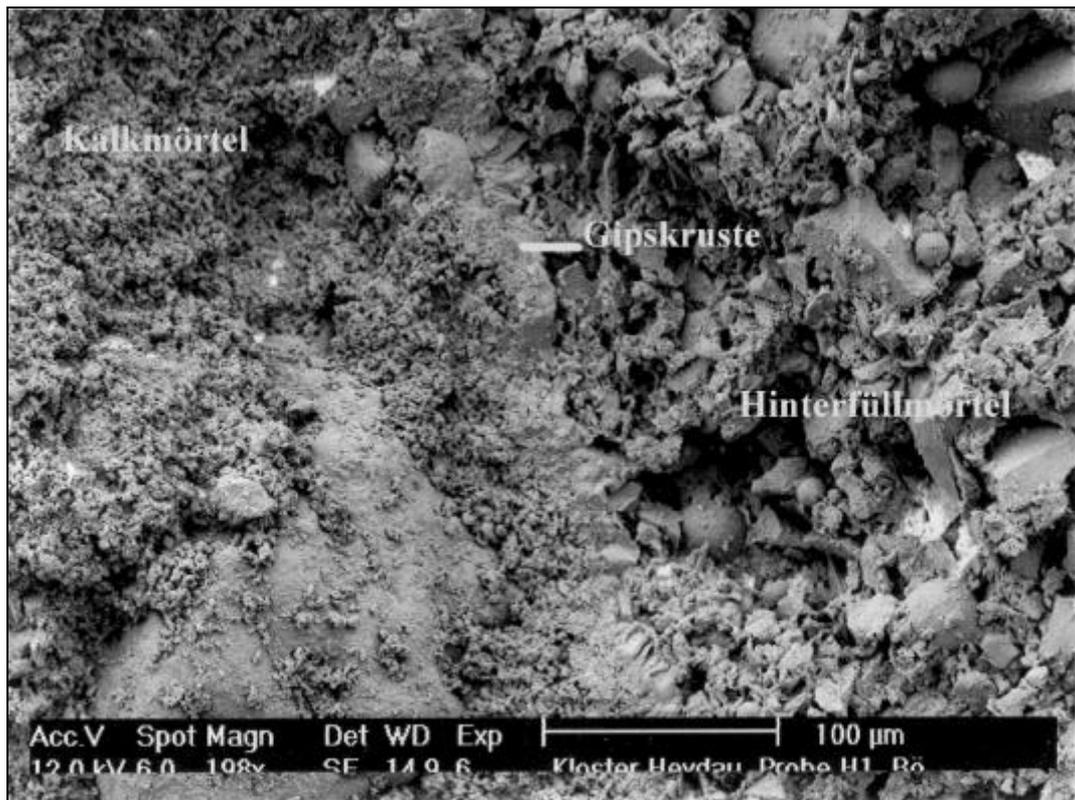


Bild 28: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Verbundes des Mörtels VHGX2 (rechte Bildhälfte) mit Kalkputz (linke Bildhälfte). Im Hinterfüllmörtel sind Quarzzuschlag und Borosilikatglaskugeln erkennbar. Zwischen Hinterfüllmörtel und Kalkputz ist eine schmale Gipskruste (Bildmitte, von unten nach oben) erkennbar.

6.4.5 Zusammenfassung der Voruntersuchungen

In Vorversuchen wurden verschiedene Bindemittelkombinationen auf Basis Tonerdezement (TZ+, TZ++), Hochofenzement (HOZ+) und sulfatisch angeregter Hochofenschlacke (HGZ) hinsichtlich ihres Penetrations- und Fließverhaltens untersucht und optimiert. Der hohe Sulfatwiderstand dieser Bindemittel konnte in Kapitel 5.4.3.3 nachgewiesen werden.

Alle geprüften Hinterfüllmörtel erfüllen die an sie gestellten Anforderungen bezüglich des Penetrations- und Fließverhaltens. Jedoch weisen die Hinterfüllmörtel unterschiedliche W/B-Werte auf und bei dem Bindemittel $HGZ < HOZ+ < TZ+ = TZ++$.

Die Bindemittel beeinflussen die Festmörteleigenschaften maßgebend. So sind:

- die hygrischen Dehnungen bei $HGZ < HOZ+ \ll TZ++ < TZ+$
- die Festigkeiten bei $HGZ > HOZ+ > TZ++ > TZ+$

Der Einsatz von MC senkt die Festigkeiten (auch die Haftzugfestigkeiten) und erhöht die hygrischen Dehnungen. Höhere Kd L Gehalte (VHOZ1) erhöhen die Haftzugfestigkeit und senken den E-Modul.

Alle geprüften Hinterfüllmörtel der Vorversuche erfüllen die an sie gestellten Anforderungen bezüglich des Penetrationsverhaltens, viele Mörtel auch die Vorgaben an die Festmörteleigenschaften. Die E-Moduln sind häufig zu hoch und die Haftzugfestigkeiten zu niedrig. Hinterfüllmörtel auf Basis TZ+ und TZ++ erzielen zu geringe Festigkeiten und zu hohe Dehnungen. Sie sollten im Rahmen der Hauptversuche nicht eingesetzt werden. Bis auf die Probe VHGX2 bilden die Mörtel geringfügige Ausblühungen von Calcit und Gips aus.

Die beiden geeignetsten Hinterfüllmörtel VHOZ2 und VHGX2 wurden an Musterflächen appliziert und 12 Monate später der Verbund und die Haftzugfestigkeiten überprüft. Der Verbund war bei verschiedenen Putzsituationen wie Kalkputz auf Sandstein, Gipsputz und auf Lehm ungestört, schädliche Kristallneubildungen nicht erkennbar und die Haftzugfestigkeit im Bereich der Laborergebnisse.

6.5 Untersuchungsergebnisse der Hauptuntersuchungen

6.5.1 Zusammensetzung der Hinterfüllmörtel der Hauptuntersuchungen

Im Rahmen der Hauptuntersuchungen fanden weitere Verbesserungen der Frisch- und Festmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel statt. Die grundsätzliche Eignung der Bindemittel HGZ und HOZ+ ist das Ergebnis der Voruntersuchungen. Zusätzlich wurde das Bindemittel Mikro, dessen Sulfatwiderstand positiv auffiel (Kapitel 5.4.3.3), mit in die Hauptuntersuchungen aufgenommen.

In Tabelle A28 im Anhang sind die Mischungsverhältnisse von drei Ausgangsmischungen auf Basis

FHGZ - HGZ

FHOZ - HOZ+

FMikro - Mikro

aufgeführt, an denen die Optimierung der Frischmörteleigenschaften der Hauptversuche stattfand. Als relevante Eigenschaften kamen die Auslaufzeiten, die Penetrationseigenschaften und die Sedimentationsneigung in Betracht.

Die Hinterfüllmörtel wurden für die Frischmörtelprüfungen wie folgt hergestellt: Einer vorgegebenen Wassermenge, bei HGZ-Mörteln entsprechend einem W/B-Wert von 1:1,0, bei HOZ-Mörteln von 1:1,2 und bei Mikro von 1:2,0, wird der homogenisierte Trockenmörtel zugegeben. Diese Ausgangsmischungen wiesen die bestmöglichen Verarbeitungseigenschaften bei geringstmöglichem Wassergehalt auf. Zur Mischung der Hinterfüllmörtel muß ein Dispergator mit 12000 Umdrehungen pro Minute verwendet werden, damit sicher alle Agglomerate zerstört werden. Nach einer Mischdauer von 5 Minuten sind die Hinterfüllmörtel für die Verarbeitung bzw. Prüfungen bereit.

In den durchgeführten Untersuchungen wurden die drei Ausgangsmörtel mit verschiedenen Zusätzen (BVK, HGK, PUR, Kd P, Kd L, MC)¹⁰⁸ modifiziert, um die Frischmörteleigenschaften zu optimieren. Die Optimierung der Mörtel erfolgte in mehreren Schritten. Bei positiven Einflußnahmen wurde die bis dahin beste Zusammensetzung als Grundmischung in den nächsten Optimierungsschritt übernommen und damit der Einfluß der Zusätze bei gemeinsamem Einsatz geprüft. In den Tabellen A29 bis A31 im Anhang sind die Ergebnisse von insgesamt 111 geprüften Mischungen, aufgeschlüsselt nach dem jeweiligen Bindemittel, aufgeführt. Die folgenden Einflußnahmen der Zusätze konnten festgestellt werden:

- BVK Verbesserung der Auslaufzeit und des Penetrationsverhaltens, ab etwa 10 M.-% Zusatz Verschlechterung des Sedimentationsverhaltens
- HGK Verbesserung der Auslaufzeit und des Penetrationsverhaltens. Sie fällt nicht so deutlich aus wie bei den BVK. Bei größeren Mengen als 1,12 M.-%¹⁰⁹ verschlechtert sich das Penetrationsverhalten, und es kommt zu Entmischungen bei der Prüfung des Sedimentationsverhaltens, d. h. ein Teil der HGK schwimmt auf.
- MC Verbesserung des Sedimentationsverhaltens der Mörtel. Die Penetrationseigenschaften des FHOZ werden ab Zugabemengen von 0,12 M.-%, die des FHGZ und FMikro sofort verschlechtert.
- PUR Verbesserung aller Frischmörteleigenschaften. Ab einer Zusatzmenge von 6,0 M.-% wird das Fließverhalten verschlechtert.
- Kd P Verbesserung des Auslaufverhaltens des FMikro bis 2 M.-%, ab 6 M.-% Verschlechterung aller Eigenschaften
- Kd L Verbesserung des Fließverhaltens bis etwa 2 M.-%, ab 8 M.-% Verschlechterung aller geprüften Eigenschaften

Nach den 4 Optimierungsschritten mit kombinierter Zugabe der verschiedenen Zusätze stellten sich die drei nachfolgend aufgeführten Mischungen als Ergebnis der Optimierung heraus:

- **HGZ** mit 10 M.-% BVK, 4 M.-% PUR und 2 M.-% Kd L
- **HOZ+** mit 10 M.-% BVK, 4 M.-% PUR, 0,08 M.-% MC¹¹⁰ und 2 M.-% Kd L
- **Mikro** mit 10 M.-% BVK, 4 M.-% PUR und 2 M.-% Kd P

Diese optimierten Hinterfüllmörtel wiesen bei allen geprüften Frischmörteleigenschaften verbesserte Ergebnisse auf und erfüllten das Anforderungsprofil.

Im Rahmen der Hauptversuche wurden 36 Hinterfüllmörtel mit den in Tabelle A32 im Anhang angegebenen Zusätzen untersucht. Dabei variierten die Zusätze von:

¹⁰⁸ Die Erläuterung der einzelnen Zusätze sind in Kapitel 6.3.3, Seite 107 aufgeführt.

¹⁰⁹ Die wesentlich geringere Dichte der Hohlglaskugeln erlaubte bei gleichem Zugabevolumen die Reduzierung der Zugabemengen. Die Dichte der Glaskugeln BVK betrug 2,54 g/cm³, die der HGK 0,22 g/cm³.

¹¹⁰ Auf die Zugabe der MC wurde im Hauptprogramm verzichtet, da sie sehr leicht von Mikroorganismen angegriffen wird.

Kd L in HGZ und Mikro - 0 und 2 M.-%

Kd P in HOZ+ - 0 und 2 M.-%

PUR in allen Bindemittel - 0; 4,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0 M.-%

Die jeweiligen Mischungen wurden entsprechend der angegebenen Zusammensetzung eine Stunde im Turbula-Mischer, System Schatz, homogenisiert. Aus diesen Trockenmörteln wurden dann Prüfkörper hergestellt.

6.5.2 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Abweichend von den Voruntersuchungen wurden die Prüfungen der Mörtel Eigenschaften mit einem Ausbreitmaß von $17,5 \pm 0,5$ cm durchgeführt. Das bedeutet einen gegenüber der Verarbeitungskonsistenz der Hinterfüllmörtel deutlich reduzierten Wassergehalt. Aufgrund der sich durch Wasserentzug am Bauwerk nach kurzer Zeit einstellenden Konsistenz der Hinterfüllmörtel ist dies zulässig und sogar erforderlich, um die Mörtel Eigenschaften möglichst praxisnah zu erfassen. Hierzu wurden Versuche durchgeführt. Ziel war es, die Konsistenz der Hinterfüllmörtel zu bestimmen, die sich 15 Minuten nach dem Einbringen der Hinterfüllmörtel in einem 5 mm breiten Hohlraum zwischen zwei Sandsteinplatten einstellt. Hierzu fanden zwei Sandsteinvarianten (Baumberger Sandstein, Roter Mainsandstein) mit unterschiedlichen Wasseraufnahmekoeffizienten Verwendung, damit stärker und schwächer saugende Untergründe simuliert werden können.

Die Verbundkörper wurden 15 Minuten nach Verfüllung der künstlich erzeugten Hohlräume getrennt, die Hinterfüllmörtel entfernt, kurz (30 sec.) im Normmischer gemischt und anschließend deren Konsistenz über das Ausbreitmaß bestimmt. Je nach Sandsteinvarianten (Baumberger Sandstein, Roter Mainsandstein) schwankte das Ausbreitmaß der Mörtel zwischen 13 cm und 17 cm.

Die Herstellung der Normprismen erfolgte nach DIN 1164 Teil 5. Abweichend war der Wasser/Bindemittelwert. Dieser wurde über das Ausbreitmaß eingestellt. Zudem wurden die Zusätze Em und PUR¹¹¹ im Zugabewasser mit einem Dispergator mit 12000 U/min 20 s emulgiert, in diese Emulsion dann ggf. Kd L gegeben. Anschließend wurde die Emulsion in den Mischtroch eines Normmischers (nach DIN EN 196, Teil 1) gegeben und der Trockenmörtel beigemischt. Die Mischdauer der Hinterfüllmörtel betrug 5 Minuten auf Stufe 1. In Anlehnung an die DIN 18555 Teil 3 Abschnitt 3.2.4 wurde der Frischmörtel in die Prismenformen gefüllt und nach dem Vibrationsverfahren verdichtet.

¹¹¹ Die Angabe von PUR schließt stets die Zugabe von 4 M.-% Emulgator (Em) bezogen auf die PUR-Menge ein.

Die Lagerung der Normprismen erfolgte bis zum Alter von 7 Tagen nach DIN 18555 Teil 3 Abschnitt 4. In den verbleibenden Tagen bis zu den Prüfterminen wurden die Prismen im Normklima DIN 50014-23/50-2 gelagert.

Zur Herstellung der Mörtel-Verbundkörper wurden sandgestrahlte Beton-Gehwegplatten (30x30x5 cm) verwendet. Die Herstellung erfolgte in Anlehnung an DIN 18555 Teil 6. Die Gehwegplatten wurden ca. 30 Minuten vor dem Aufbringen des Frischmörtels 1 Minute lang in Wasser gelegt, um eine gleichmäßige Betonfeuchte zu erlangen. Die hergestellten Verbundkörper lagerten zunächst mit Folie abgedeckt 7 Tage im Labor, anschließend erfolgte die Lagerung bis zu dem Prüftermin nach DIN 18555 Teil 6.

Die Herstellung der Mörtelplatten für die Bestimmung der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl erfolgte in Anlehnung an DIN 1164 Teil 5. Dazu wurden kreisförmige Mörtelprüfkörper mit einem Durchmesser von 145 mm und einer Dicke von 15 mm hergestellt. Die Probekörper lagerten zunächst 7 Tage im Feuchteschrank, danach bis zu den Prüfterminen im Normklima DIN 50014-23/50-2.

6.5.3 Frischmörteluntersuchungen

6.5.3.1 Konsistenz

Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen sind in Tabelle A33 im Anhang zusammengestellt. Der Wasserbedarf zum Erreichen des Ausbreitmaßes von $17,5 \pm 0,5$ cm ist trotz der hohen Feinheit der verwendeten Materialien niedrig. Dies ist in erster Linie auf die Verwendung von Fließmittel zurückzuführen. Von den Hinterfüllmörteln auf Basis Mikro konnte nur der Mörtel Mikro1 derart hergestellt werden. Alle anderen Mörtel auf Basis Mikro wiesen bei Zugabe von PUR ein ausgeprägtes rheopexes¹¹² Verhalten auf, welches die Bestimmung des Ausbreitmaßes unmöglich machte. Die W/B-Werte dieser Mörtel wurden deshalb konstant gehalten.

Der Wasseranspruch (WA) bei den HGZ- und HOZ+-Mörteln ist abhängig vom Bindemittel und ist bei $HGZ < HOZ+ < Mikro$.

Durch den Einsatz von PUR und Em wird der Wasseranspruch der HGZ- und HOZ-Hinterfüllmörtel deutlich erniedrigt. Bei höheren PUR-Zugaben ist der WA bei HGZ und HOZ+ vergleichbar. Alle Mörtel wiesen bis auf solche auf Basis Mikro ein leichtes rheopexes Verhalten auf. Es unterstützt die Applikation in der Praxis.

¹¹² Rheopexes Verhalten bedeutet Ansteifen der Mörtel bei Bewegung oder Erschütterung und Übergang zum Fließen beim Ruhen der Mörtel.

6.5.4 Festmörteluntersuchungen

6.5.4.1 Mechanische Eigenschaften

In Tabelle A34 bis A35 im Anhang sind die Ergebnisse der E-Modulprüfungen (E_{dyn}), der Biegezug- (β_{BZ}), Druck- (β_{D}) und Haftzugfestigkeitsprüfungen (β_{HZ}) nach 7, 28 Tagen und z. T. nach 1 Jahr Lagerungsdauer (E_{dyn} , β_{BZ} , β_{D}) angegeben.

Die Druckfestigkeiten der unmodifizierten Hinterfüllmörtel sind abhängig vom Bindemittel und häufig in der Reihenfolge HOZ+ < HGZ << Mikro.

Alle untersuchten mechanischen Eigenschaften der Hinterfüllmörtel erfahren erwartungsgemäß eine deutliche Beeinflussung durch Zusätze wie Kunststoffdispersion (Kd L, Kd P) und PUR unabhängig von der üblichen Veränderung mit der Lagerungsdauer. Kd und PUR, erhöhen die Verformbarkeit, siehe Bild 29, senken die Druckfestigkeit und erhöhen häufig die Biegezug- und Haftzugfestigkeiten.

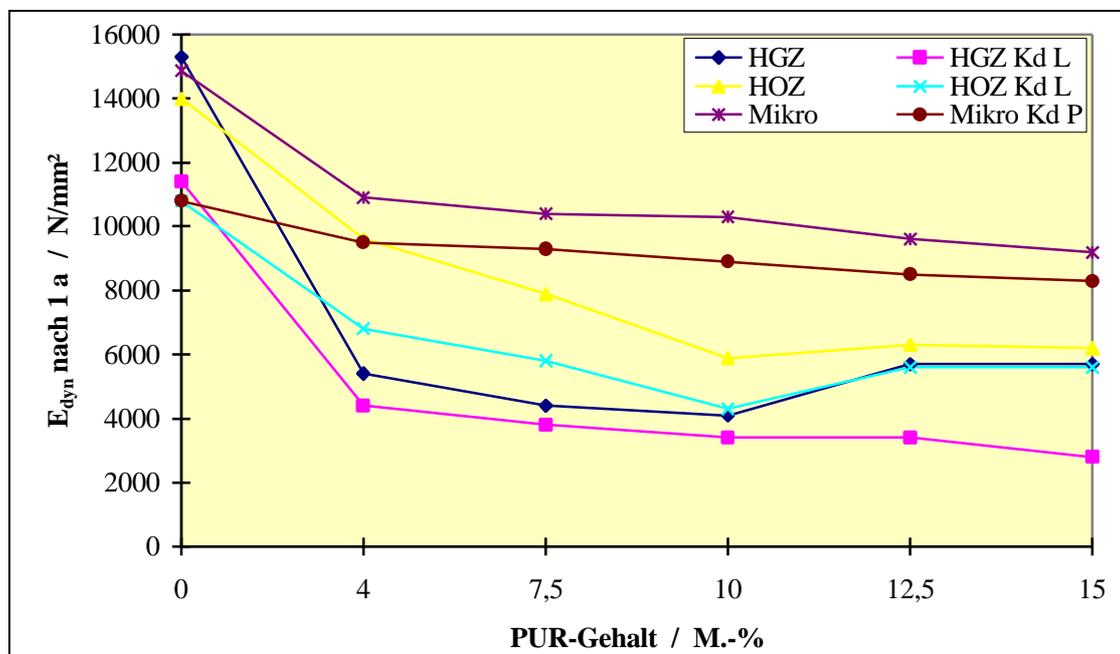


Bild 29: E-Modul (E_{dyn}) der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche in Abhängigkeit vom PUR- und Kd-Gehalt im Alter von 1 Jahr

β_{HZ} ist bei allen Mörteln bedingt durch die Optimierung der Zusammensetzung und die geringe Wasserzugabe gegenüber den Hinterfüllmörteln der Vorversuche deutlich erhöht.

Das Anforderungsprofil wird bei den Druckfestigkeiten und E-Modul von keinem unmodifizierten Hinterfüllmörtel erfüllt. Stets treten insbesondere beim Bindemittel Mikro zu hohe Festigkeiten auf. PUR senkt β_{D} und E_{dyn} der Mörtel mit dem Bindemittel HGZ und HOZ+ stark. Mörtel mit HGZ erfüllen mit der geringsten Zugabe von 4 M.-% PUR das Anforderungsprofil, während bei HOZ nur der E-Modul im gewünschten Bereich liegt. Zusätzlicher Einsatz von Kd führt hier zu einem E-Modul von ca. 7000 N/mm² und β_{D} von ca. 13 N/mm² - hier liegt eine grundsätzliche Eignung

wegen des niedrigen E_{dyn} trotz zu hoher Druckfestigkeit vor. Die Haftzugfestigkeiten aller Hinterfüllmörtel befinden sich im geforderten Bereich.

6.5.4.2 Hygrische Eigenschaften

Hygrische Dehnung

Die Ergebnisse des 1. Schwindens sowie des Quell- und Schwindverhaltens sind in Tabelle A33 im Anhang zusammengestellt.

Die hygrischen Dehnungen der unmodifizierten Hinterfüllmörtel sind abhängig vom Bindemittel und bei $\text{HGZ} < \text{HOZ} < \text{Mikro}$, dabei weist Mikro insbesondere beim Quellen und 2. Schwinden hohe Werte auf.

Die Ergebnisse zeigen bei allen Mörteln ein stärkeres **1. Schwinden** der Hinterfüllmörtel als in den Vorversuchen. Der Zusatz von PUR reduziert bei geringen Zusätzen (4 M.-%) das 1. Schwinden bei Mörteln ohne Kd. Bei höheren PUR-Gehalten wird das 1. Schwinden verstärkt. Dieses unerwartete Verhalten hängt nach Auskunft des Herstellers mit einer Veränderung des PUR zwischen den Vor- und Hauptversuchen zusammen, welches die Eigenschaften des PUR in der Lackherstellung (Herstellungszweck) deutlich verbessert hat.

Das **Quellen** und **2. Schwinden** ist bei den modifizierten Proben so groß, daß der Einsatz des PUR mit Zusatzmengen > 4 M.-% generell abzulehnen ist. Das Quellen ist bei hohen PUR-Gehalten (≥ 10 M.-%) bei Hinterfüllmörteln auf Basis HGZ und HOZ um ein Mehrfaches höher als das nachfolgende Schwinden. Dies ist abhängig von der Druckfestigkeit des jeweiligen Mörtels. Bei hohen Druckfestigkeiten ist das 2. Schwinden vergleichbar dem Quellen. Kd L und Kd P verändern die hygrischen Dehnungen unwesentlich.

Wasseraufnahme und Wasserabgabe

In Tabelle A36 im Anhang sind die Wasserkennwerte wie Wasseraufnahmekoeffizienten (ω), Wasseraufnahmegrade (w_m) und die μ -Werte der Hinterfüllmörtel aufgeführt. Die Proben waren zu Beginn dieser Untersuchungen 28 Tage alt. Tabelle A37 im Anhang enthält die Kennwerte der Wasserabgabe wie Zeitpunkt des Übergangs zum 2. Trocknungsabschnitt (t_{knick}), Verdunstungsmassenstromdichte (\dot{m}_{knick}), Wasserabgabekoeffizient (w_{ak}), Wasserabgabegrad (w_{ab}).

Die **Wasseraufnahmekoeffizienten** und **Wasserabgabekoeffizienten/Verdunstungsmassenstromdichten** sowie die **Wasseraufnahme- und Wasserabgabegrade** der Hinterfüllmörtel bewegen sich, mit Ausnahme des Mikro, in einem Bereich, der, soweit Daten vorliegen, auch bei Kalkmörteln angetroffen wird (BÖTTGER 1994¹¹³,

¹¹³ BÖTTGER 1994: S. 23, Tabelle 4

BOENKENDORF 1995¹¹⁴ und Tabelle A12 im Anhang). Kalkmörtel können jedoch auch wesentlich höhere Wasseraufnahmekoeffizienten aufweisen.

Die ω -Werte sind deutlich größeren Schwankungen ausgesetzt als die Wasseraufnahmegrade. Die Wasserabgabegrade sind durch die Sorptionsfeuchte bei den Lagerungsbedingungen begrenzt. Der Zeitpunkt des Übergangs zum 2. Trocknungsabschnitt liegt bei HGZ- und HOZ+-Hinterfüllmörteln zwischen 39 und 108 Stunden, bei Mikro zwischen 7-16 Stunden.

Beim Vergleich des w_{ak} und der \dot{m}_{knick} fällt auf, daß die Ergebnisse erwartungsgemäß in einem ähnlichen Bereich liegen. Dabei ist $w_{ak} > \dot{m}_{knick}$, wenn $t_{knick} > 24$ Stunden ist und $w_{ak} < \dot{m}_{knick}$, wenn $t_{knick} < 24$ Stunden ist.

Die Hinterfüllmörtel lassen folgende Einflüsse abhängig vom Bindemittel erkennen: ω -Werte: HOZ > HGZ > Mikro und \dot{m}_{knick} : Mikro << HOZ+ < HGZ.

Die Wasseraufnahme- und Wasserabgabekoeffizienten verändern sich mit der PUR- bzw. Kd-Zugabe. Während die Kd in der Regel die ω -Werte senkt, führt PUR zu unterschiedlichen Entwicklungen, siehe Bild 30. Die Ansprüche des Anforderungsprofils werden wie folgt erfüllt:

- ω -Werte bewegen sich im geforderten Bereich von 0,5-10 kg/(m²·h)
- w_{ak} -Werte, Soll - 0,1-0,2 kg/(m²·h) werden von Hinterfüllmörteln auf Basis HGZ und z. T. von HOZ+-Mörteln erreicht

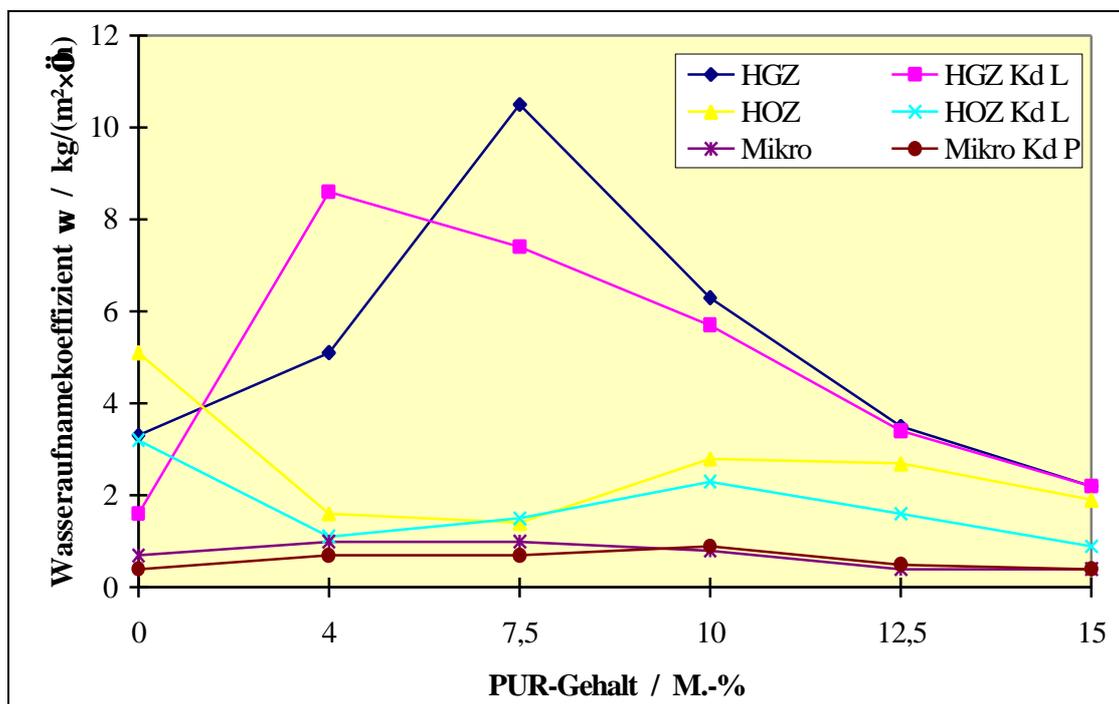


Bild 30: Wasseraufnahmekoeffizienten (ω) der Hinterfüllmörtel im Alter von 1 Jahr der Hauptversuche in Abhängigkeit vom PUR- und Kd-Gehalt

Bei dieser Aussage ist jedoch festzuhalten, daß der Zeitpunkt zum 2. Trocknungsabschnitt deutlich später als bei Kalkmörteln ist und die Wasserabgabe nach 24 Stunden

¹¹⁴ BOENKENDORF 1995: S. 107, Anhang A3 ; S. 110, Anhang A4

nur bei ca. 30-50 % der historischen Mörtel liegt. Dies ist bedingt durch die unterschiedlichen Probekörperabmessungen. Die untersuchten historischen Proben haben, verglichen mit den Normprismen, ein günstigeres Flächen/Volumen-Verhältnis, das ca. dreimal mehr Fläche bezogen auf das Volumen des Körpers aufweist.

μ -Werte

In Tabelle A36 im Anhang sind die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen (μ) der untersuchten Mörtel angegeben. Die Proben waren zu Beginn dieser Untersuchungen 28 Tage alt.

Die μ -Werte der Hinterfüllmörtel sind sehr unterschiedlich und werden vom Bindemittel geprägt. Ohne Zusätze sind sie bei den Bindemitteln HOZ+ < HGZ << Mikro und bei HOZ+-Mörteln relativ niedrig (μ -Wert - 20).

PUR beeinflusst die Wasserdampf-Diffusion, siehe Bild 31, bei HGZ und Mikro wird eine schon durch geringe PUR-Gehalt sehr deutliche Reduzierung der μ -Werte erkennbar. Es läßt sich eine gute Korrelation zwischen der Druckfestigkeit und der Wasserdampf-Diffusion erkennen, siehe Bild 32. Durch den Einsatz von PUR können die μ -Werte der HGZ-Mörtel gezielt an die Kalkputze angepaßt werden. PUR-Zusatzmengen > 4 M.-% scheidet wegen der großen hygrischen Dehnungen aus.

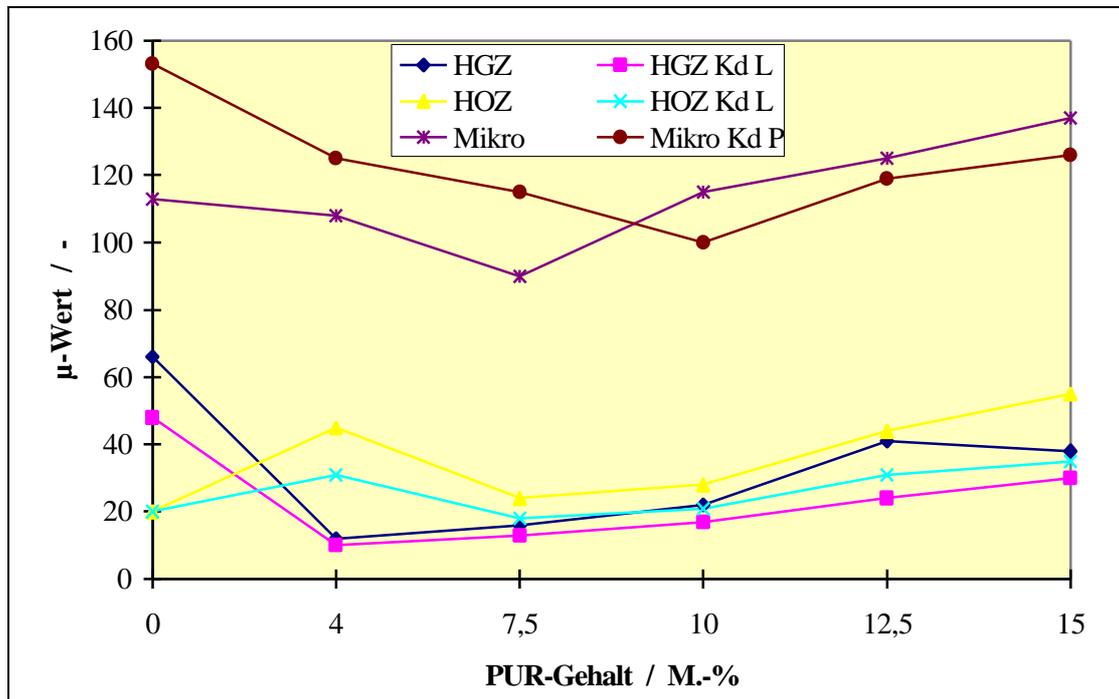


Bild 31: μ -Werte der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit vom PUR- und Kd-Gehalt

Die μ -Werte und Wasserabgabekoeffizienten (w_{ak}) lassen Abhängigkeiten voneinander erkennen, siehe Bild 33, da bei beiden Diffusionsvorgänge eine Rolle spielen.

Die Ansprüche des Anforderungsprofils werden von Mörteln auf Basis HGZ und HOZ+ erfüllt. Z. T. treten bei höheren PUR-Gehalten besonders niedrige μ -Werte auf. Diese Hinterfüllmörtel scheidet jedoch wegen des ungünstigen hygrischen Verhaltens für Restaurierungsmörtel aus.

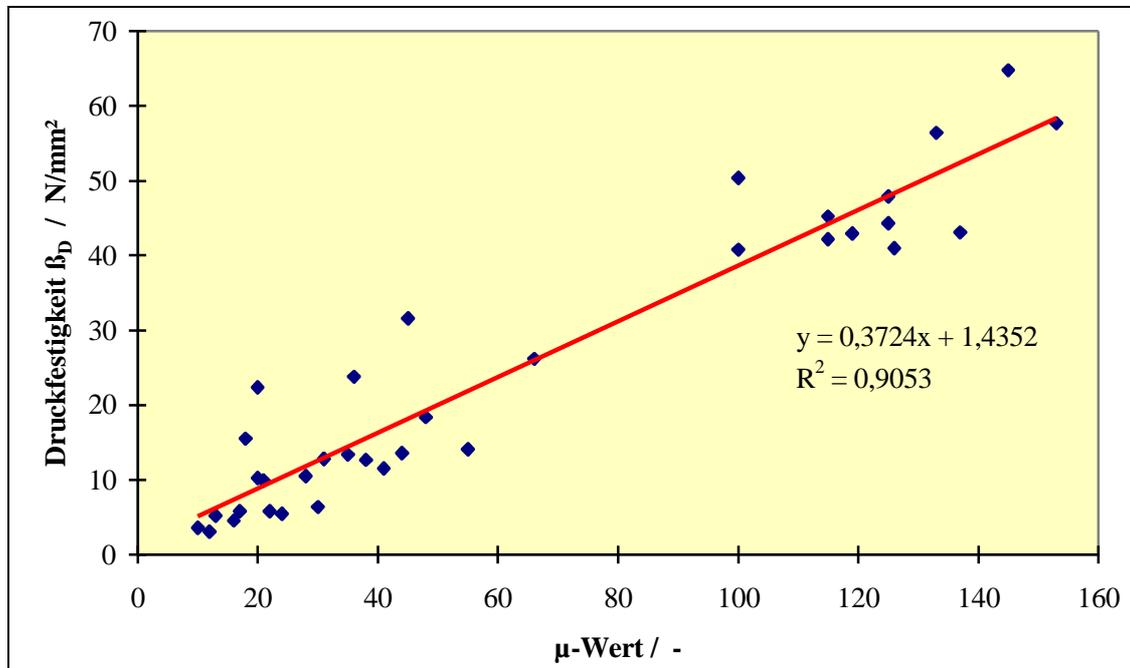


Bild 32: Korrelation zwischen Druckfestigkeit der Hinterfüllmörtel und μ -Werten im Alter von 28 Tagen

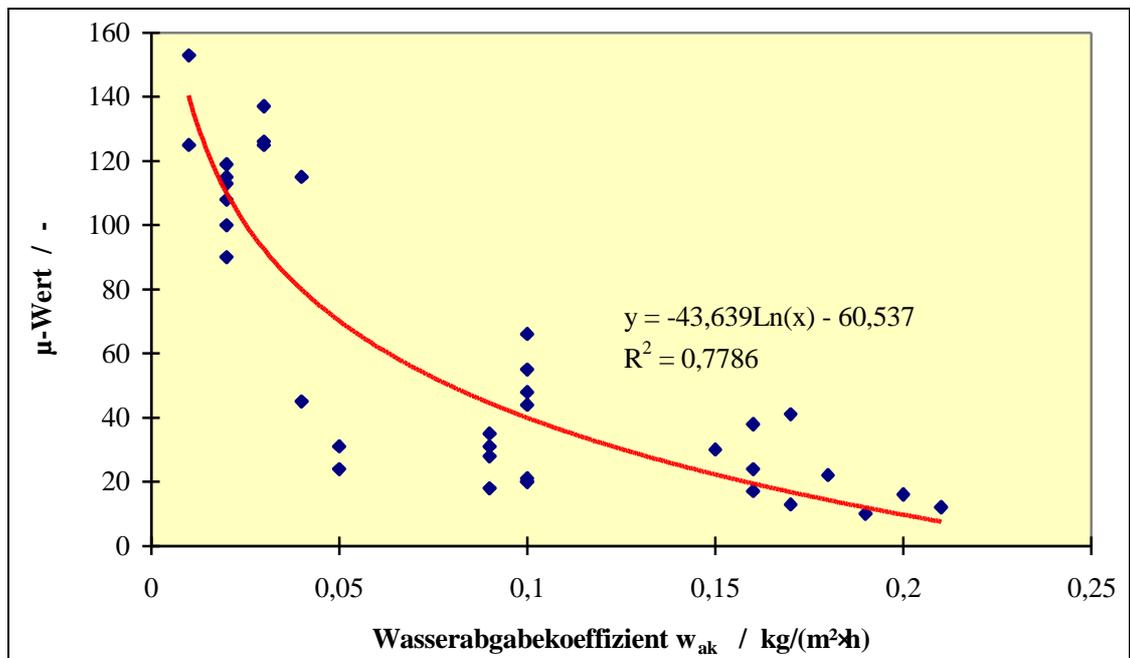


Bild 33: Korrelation zwischen den μ -Werten der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 28 Tagen und deren Wasserabgabekoeffizienten w_{ak} im Alter von 1 Jahr

6.5.4.3 Ausblühverhalten

Das Ausblühverhalten aller Mörtel wurde über 20 Zyklen hinweg gemessen, Probestarter zu Beginn 28 Tage. Die meisten Hinterfüllmörtel wiesen hierbei im Gegensatz zu den Mörteln der Voruntersuchungen keinerlei Ausblühungen auf, siehe Tabelle A41 im Anhang.

Nur bei den Hinterfüllmörtel auf Basis Mikro zeigten sich z. T. erhebliche Ausblühungen bei Verwendung von PUR. Diese Ausblühungen bestehen z. T. aus Alkalisulfaten (Aphthitalit, $K_3Na(SO_4)_2$), was für den vorgesehenen Einsatz unannehmbar ist.

Die Ursache der Ausblühungen ist im verwendeten Bindemittel Mikro zu suchen. Es enthält wasserlösliche Verbindungen wie Alkalisalze, Gips und Calciumhydroxid, welche infolge des Wassertransports durch die Poren des Mörtels an die Oberfläche gelangen können. Verdunstet das Wasser, bleiben die Salze als Belag an der Mörteloberfläche zurück. Aphthitalit kann sich aus Alkalisulfaten bilden, die bei der Zementherstellung entstehen können.

Die Hinterfüllmörtel HGZ und HOZ+ erfüllen das Anforderungsprofil.

6.5.4.4 Frost-Tauwechsel-Widerstand

Der Widerstand gegen Frost-Tauwechsel wurde bei diesen Untersuchungen abweichend von der Prüfvorschrift nicht über 15, sondern über 50 Frost-Tauwechsel-Zyklen gemessen. Die Proben hatten ein Alter von 12 Monaten. Nach dieser härteren Prüfung wiesen alle Hinterfüllmörtel keine Schäden, wie z. B. Absprengungen, Absanden der Oberfläche oder Rißbildung auf, siehe Tabelle A36 im Anhang. Alle Mörtel entsprechen den Ansprüchen des Anforderungsprofiles.

6.5.4.5 Thermische Dehnung

Die thermische Dehnung der 9 Monate alten Hinterfüllmörtel, siehe Tabelle A36 im Anhang, ist geringfügig abhängig vom Bindemittel ($HOZ+ < Mikro < HGZ$) und nimmt mit steigendem Kunststoffgehalt der Mörtel deutlich zu. Die thermischen Dehnungen der Hinterfüllmörtel liegen zwischen ($\alpha_T 3,0-6,7 \cdot 10^{-6}/K$), siehe Tabelle 12 im Anhang und weisen eine geringere thermische Dehnung als Kalkmörtel ($\alpha_T 7,1-11,0 \cdot 10^{-6}/K$) auf.

6.5.4.6 Sorptionsverhalten

Die Sorptionsisothermen der Sorptionsdehnungen der Hinterfüllmörtel wurden nach dem Adsorptionsverfahren an ein Jahr alten Proben bestimmt.

Im Laufe dieser Prüfung entstanden Risse in den Hinterfüllmörteln auf Basis Mikro, einige der Prüfkörper zerfielen in haselnußgroße, kantige Stücke. Als Ursache konnte röntgenographisch eine späte Ettringitbildung (wegen zu hoher Sulfatgehalte) verantwortlich gemacht werden, die eine Verwendung dieser Mörtel für Restaurierungszwecke verbietet. Diese Schädigung der Mörtel trat bei allen Mikro-Hinterfüllmörteln auf; dabei trat der Schaden bei PUR-haltigen Mörtel später auf. Aus diesem Grunde können von den Hinterfüllmörteln auf Basis Mikro keine Sorptionsfeuchten, -isothermen, -dehnungen und inneren Oberflächen angegeben werden.

Aus den Ergebnissen, die in den Tabellen A37, A38 und A39 im Anhang dargestellt sind, ist zu entnehmen, daß die Sorptionsfeuchten und -isothermen der Mörtel ohne Polymerzusätze am höchsten sind; dabei sind sie abhängig vom Bindemittel und bei $HGZ > HOZ+$. PUR, aber insbesondere Kd, senken die Sorptionsfeuchtegehalte, siehe Bild 34. Die Sorptionsfeuchten sind vergleichbar mit denen historischer Kalkputzen (vergl. Tabellen A12 und A37 im Anhang), aber deutlich höher als die von im Labor hergestellten Kalkmörteln (BÖTTGER 1994).

Die Sorptionsdehnungen sind bei den Hinterfüllmörteln ohne Kd und/oder PUR am niedrigsten, dabei ist $HOZ < HGZ$. Kd L, aber insbesondere PUR, erhöhen die Feuchtedehnung, siehe Bild 35. Dabei treten z. T. bei 4 M.-% PUR Reduzierungen der Dehnungen (HGZ) auf. Die Zugabe von PUR zu den Hinterfüllmörteln erlaubt die Anpassung der Feuchtedehnung an Lehmbaustoffe. FIGGEMEIER 1994 bestimmt an Laborlehmen maximale Feuchtedehnungen zwischen 0,5-3,0 mm/m. Die Zunahme der Dehnungen trotz geringerer Ausgleichsfeuchte hängt damit zusammen, daß sich in Polymeren über Lösungsdiffusion Wasser löst (KLOPFER 1994¹¹⁵), was zum Quellen der Polymere führt und die auftretenden Dehnungen verursacht.

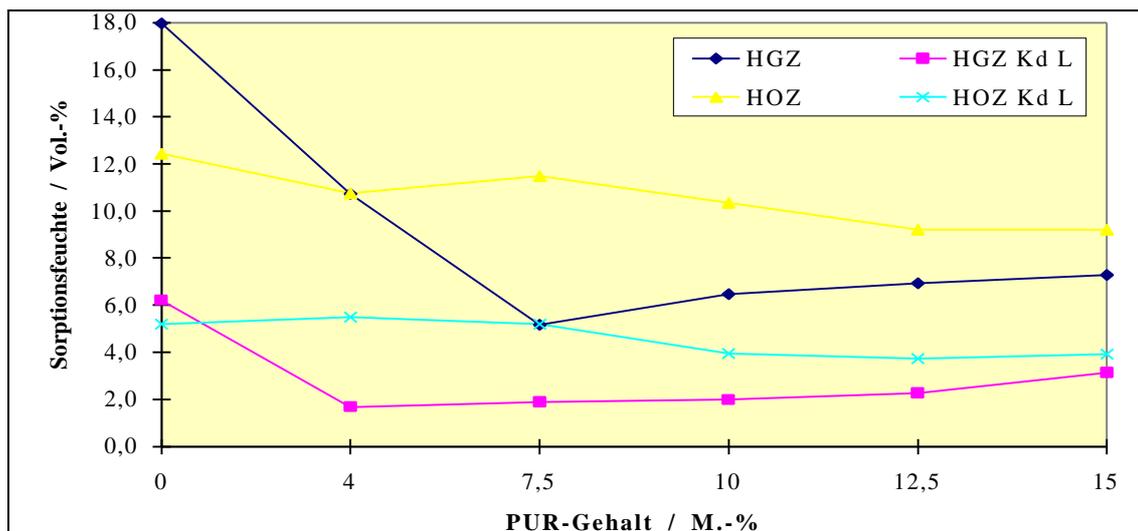


Bild 34: Sorptionsfeuchten der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 1 Jahr bei 95 % rel. Luftfeuchte in Abhängigkeit vom PUR- und Kd-Gehalt

¹¹⁵ KLOPFER 1994: S. 296 - „der Umfang der Löslichkeit“ ...,für Wassermoleküle“ nimmt „mit der Dichte der hydrophilen Gruppen in Polymeren gesetzmäßig“ zu.

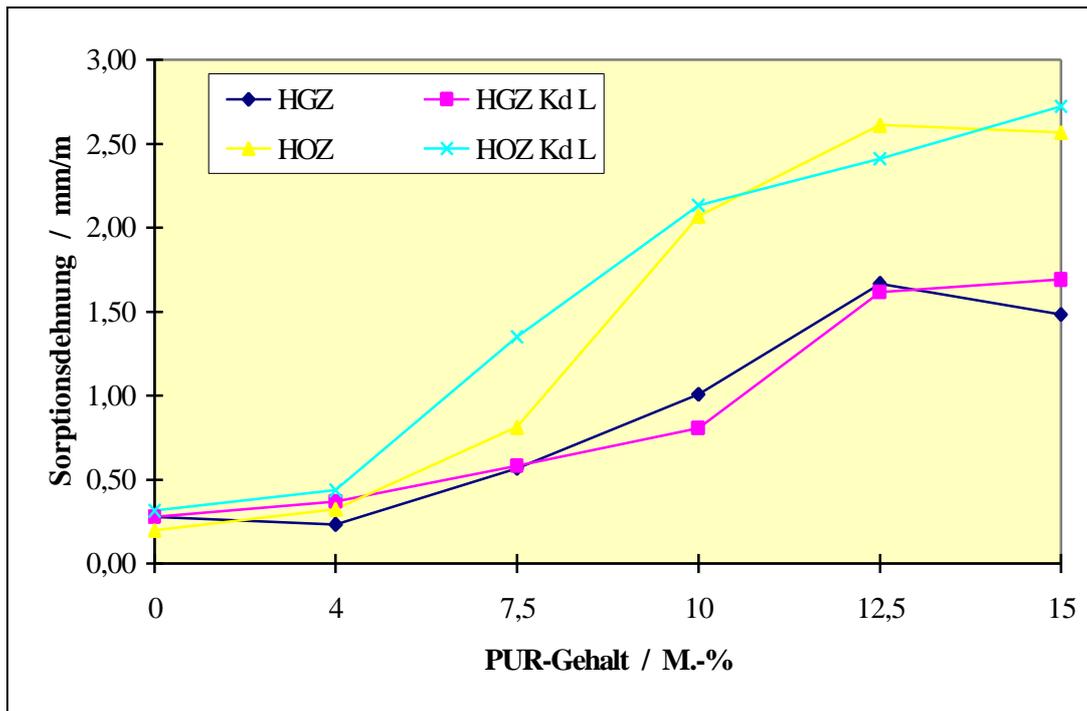


Bild 35: Sorptionsdehnungen der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 1 Jahr bei 95 % rel. Luftfeuchte in Abhängigkeit vom PUR- und Kd-Gehalt

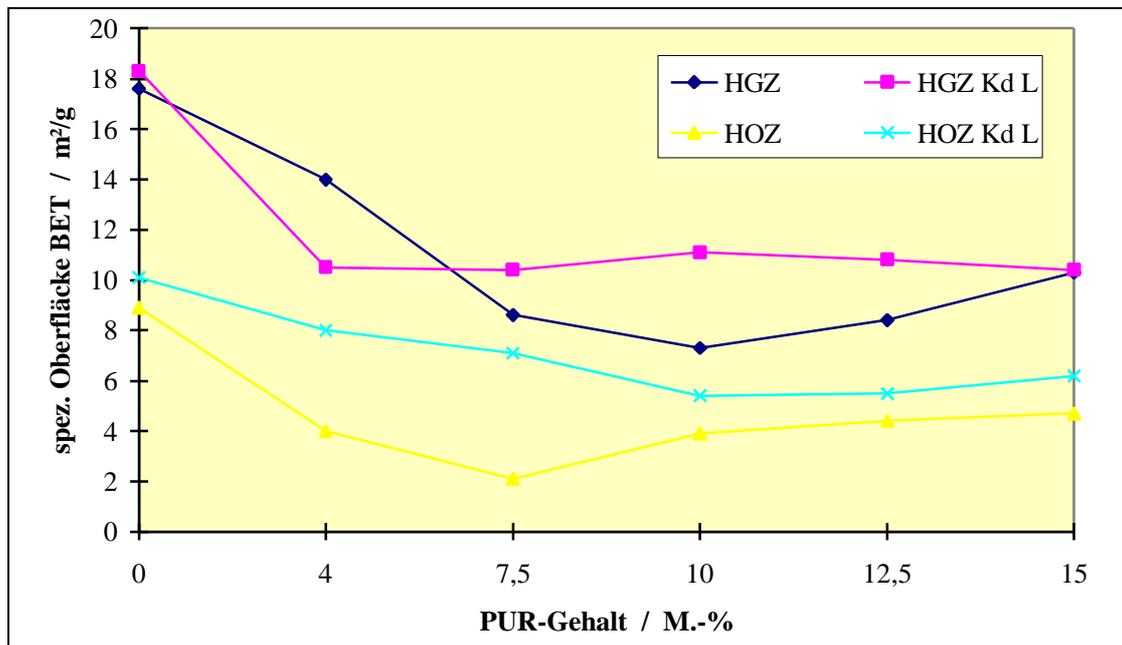


Bild 36: Innere Oberflächen nach BET (O_i) der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 1 Jahr in Abhängigkeit vom PUR- und Kd-Gehalt

Abschließend ist festzustellen, daß die Versuche recht lange dauerten (Gerätestörungen) in der Summe 9 Monate. In dieser Zeit konnten die Mörtel bevorzugt bei hohen Luftfeuchten hydratisieren. Zudem nehmen sie CO_2 aus der Atmosphäre auf und carbonatisieren. Dies beeinflusste die Ergebnisse.

6.5.4.7 Innere Oberfläche nach BET

Die Ergebnisse der Bestimmung der inneren Oberfläche nach BET sind Tabelle A36 im Anhang zu entnehmen. Die Untersuchungen fanden an 1 Jahr alten Hinterfüllmörteln statt. Die Ergebnisse zeigen, daß die inneren Oberflächen der Hinterfüllmörtel bei den unmodifizierten Mörteln am größten ist. Die Zugabe von Kd L und PUR führt zu kleineren inneren Oberflächen. PUR wirkt sich stärker aus und führt anfangs zu einer starken Reduktion der inneren Oberflächen nach BET, um bei höheren PUR-Gehalten wieder anzusteigen, siehe Bild 36. Der Wendepunkt liegt bei HGZ-Mörteln bei niedrigeren PUR-Gehalten als bei HOZ-Mörteln.

6.5.4.8 Hg-Druckporosimetrie

Rohdichte, Reindichte, Porenvolumen, Porenradienverteilung und mittlerer Porenradius der Hinterfüllmörtel in Abhängigkeit vom Bindemittel, Kd- bzw. PUR-Zusatz wurde mittels Hg-Druckporosimetrie bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle A40 im Anhang dargestellt.

Abhängig vom Bindemittel sind das Porenvolumen und der mittlere Porenradius bei Mikro < HGZ < HOZ+ und der Gelporenanteil bei Mikro > HGZ > HOZ +.

Durch den Zusatz von Kunststoffdispersion (Kd), insbesondere aber PUR, wird die Porenstruktur der Hinterfüllmörtel verändert. In Bild 37 ist der mittlere Porenradius gegen den PUR-Gehalt aufgetragen. Diesem Bild ist zudem der Einfluß der Zugabe von Kd zu entnehmen.

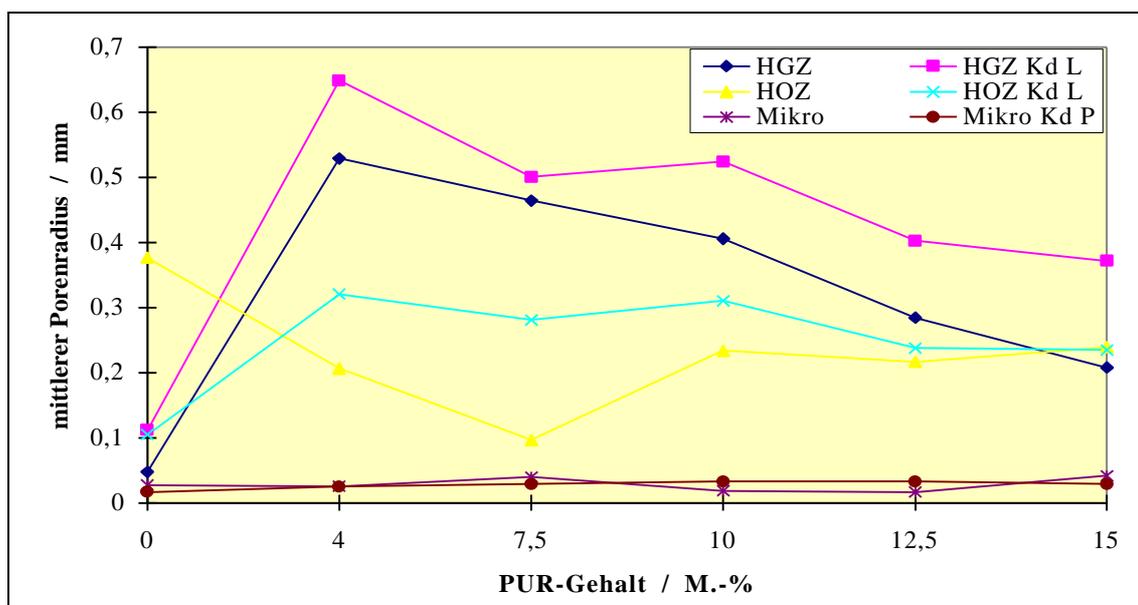


Bild 37: Abhängigkeit der mittleren Porenradien Hinterfüllmörtel vom Kd- und PUR-Gehalt im Alter von 1 Jahr

Der mittlere Porenradius ist ein Kennwert, der einen Anhaltswert über die Porenstruktur eines Stoffes liefert. In etwa gibt er die Lage des Porenmaximums des untersuchten Stoffes wieder.

Der Zusatz von PUR bewirkt in der Regel eine mehr oder weniger deutliche Zunahme des mittleren Porenradius und damit eine Vergrößerung der Porenstruktur (Rückgang des Gelporen- und Zunahme der Kapillarporenanteils). Bei einigen Hinterfüllmörteln (HGZ, HGZ Kd, HOZ Kd) tritt bei Gehalten ab 7,5 M.-% PUR eine Abnahme der mittleren Porenradien ein.

Die Porenstruktur der Hinterfüllmörtel beeinflusst maßgebend die Mörtel Eigenschaften. Für fast alle Festmörtel Eigenschaften gibt es gute Korrelationen mit der Porenstruktur - hier dem mittleren Porenradius.

So lassen sich für folgende Druckfestigkeiten, E-Moduln, Wasseraufnahmekoeffizienten, Wasserabgabekoeffizienten, μ -Werten und inneren Oberflächen Eigenschaften gute Korrelationen zu den mittleren Porenradien der Hinterfüllmörtel feststellen. Beispielhaft sind in den Bilder 38-40 die Korrelation zwischen den Druckfestigkeiten, den Wasserabgabekoeffizienten, den μ -Werten und den mittleren Porenradien dargestellt.

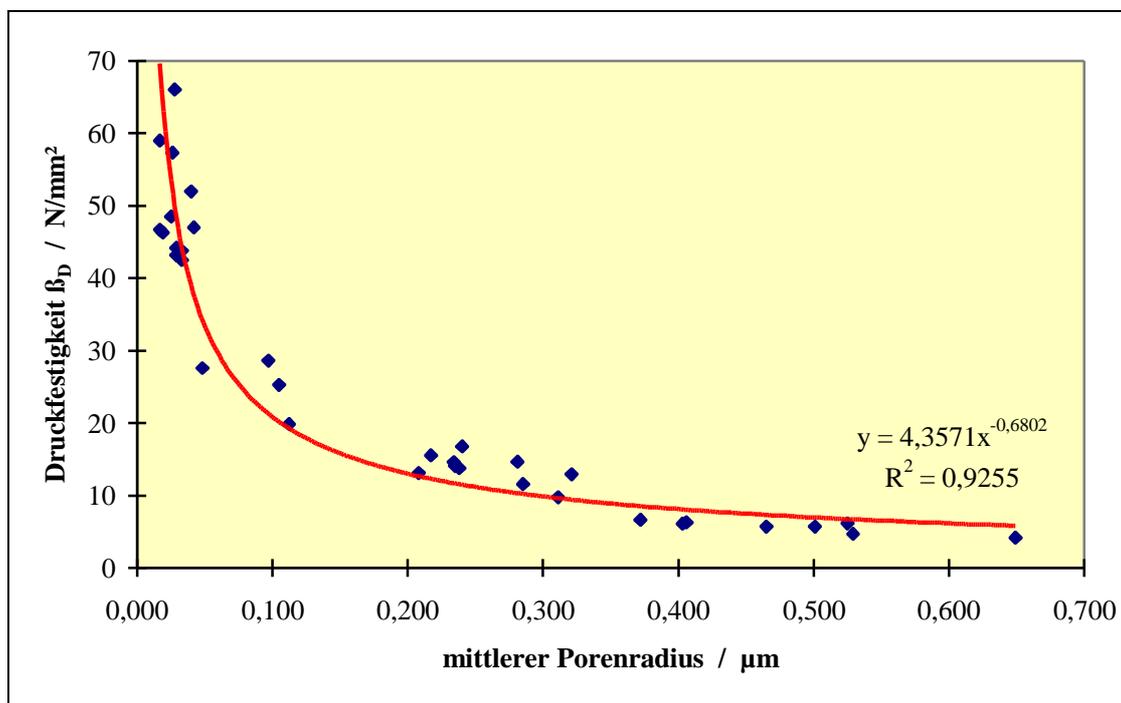


Bild 38: Korrelation der Druckfestigkeiten und den mittleren Porenradien der Hinterfüllmörtel im Alter von 1 Jahr

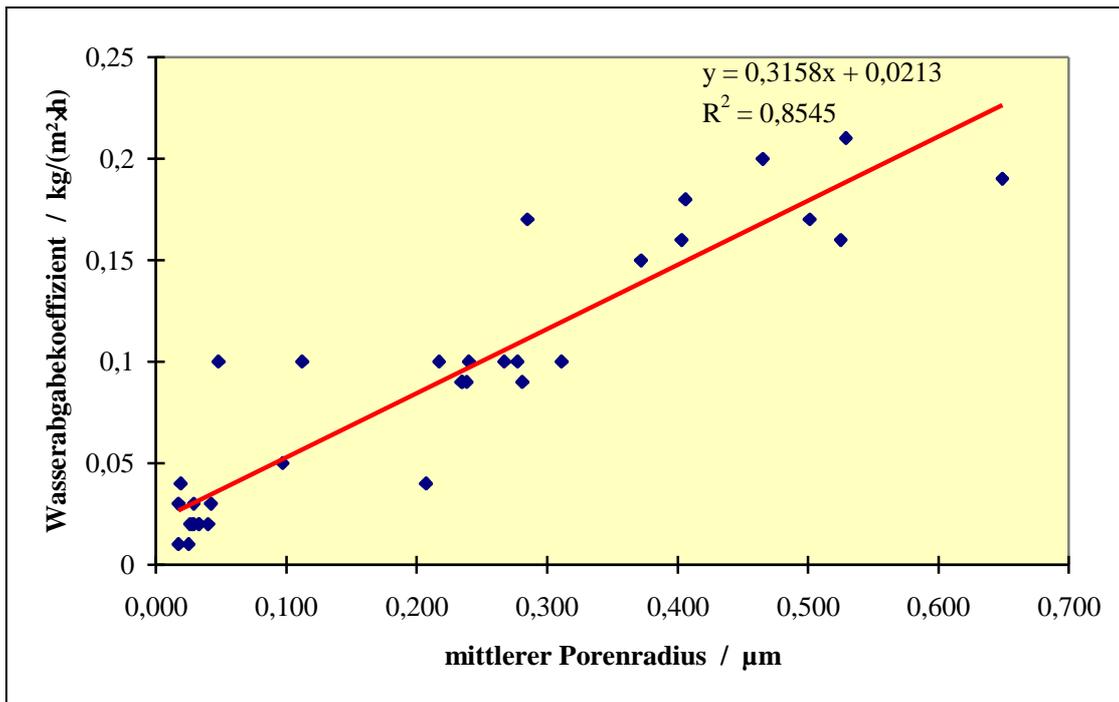


Bild 39: Abhängigkeit der Wasserabgabekoeffizienten von den mittleren Porenradien der Hinterfüllmörtel im Alter von 1 Jahr

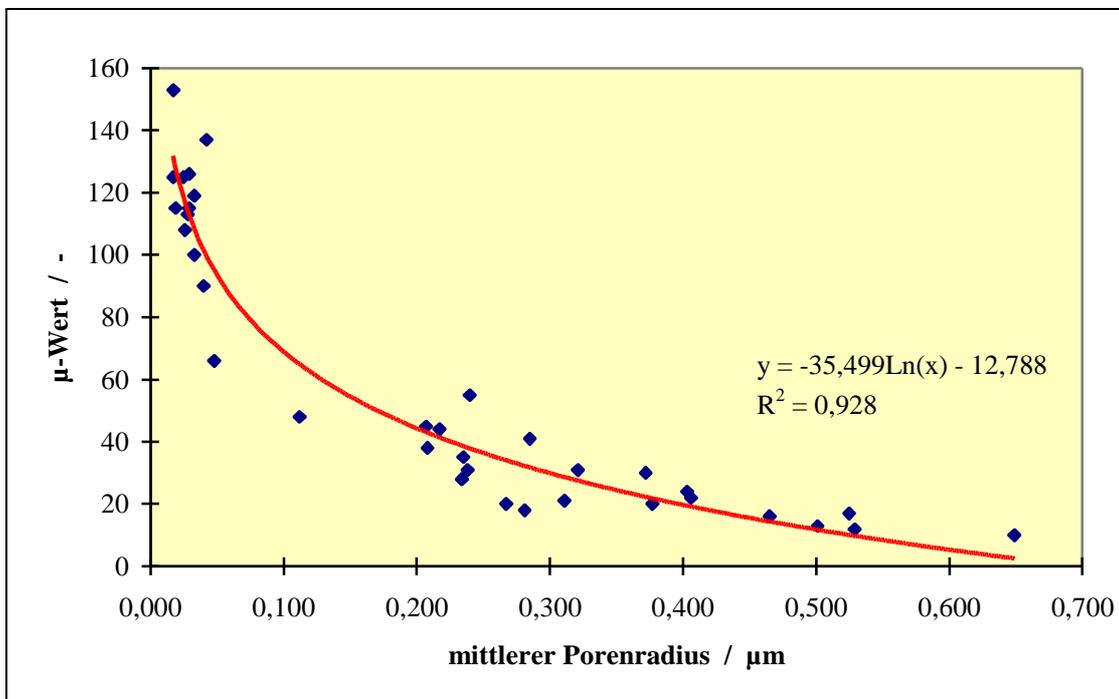


Bild 40: Abhängigkeit der μ-Werte im Alter von 28 Tagen von den mittleren Porenradien der Hinterfüllmörtel im Alter von 1 Jahr

6.5.4.9 Applikation der Hinterfüllmörtel an Musterflächen

Die Hinterfüllmörtel HGZ2 Kd, HOZ1 Kd und HOZ2 Kd wurden an Musterflächen des Magdeburger Domes und des Schweriner Schlosses appliziert. Die Hinterfüllmörtel VHOZ2 und VHGX2 der Vorserie wurden, wie berichtet, u.a. an Musterflächen des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau, der Einhardbasilika und der Fachwerkkirche Eichelsachsen angewendet.

Bei allen Prüfflächen konnte ein guter Verbund mit Putz und Putzgrund festgestellt werden, dies auch nach ein bis mehrjährigem Verbund. Dies wird auch durch Untersuchungen anderer Institutionen, z. B. der Amtlichen Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen (SCHLÜTTER 1995) an Musterflächen des Schweriner Schlosses bestätigt.

Der Verbund mit kritischen Putzen und Putzgründen wie Lehm und Gips oder vergipster Terrakotta war nach rasterelektronen- und durchlichtmikroskopischen Untersuchungen einwandfrei. Die Bildung schädlicher Kristallneubildungen bei Kontakt mit Gips bzw. stark sulfatbelasteten Bereichen war nicht feststellbar. Nach nunmehr 5jähriger Verweildauer (ehemaliges Zisterzienserkloster in Heydau) ist der Verbund immer noch einwandfrei.

6.6 Zusammenfassung zu Kapitel 6

Im Rahmen der Entwicklung von Hinterfüllmörteln, die zur Wiederbefestigung loser bzw. hohlliegenden Kalkputze dienen sollen, war eine gute Anpassung an deren technologische wie hygrische Eigenschaften erforderlich.

In Vorversuchen wurden die Eigenschaften von 8 Mörteln mit Bindemitteln bzw. Bindemittelgemischen, die einen hohen Sulfatwiderstand aufweisen, geprüft. Ihre Frischmörteleigenschaften wurden mit Fließmittel und Stabilisator verbessert und das 1. Schwinden durch PUR-Zusatz reduziert. Die Verwendung von Kunststoffdispersion verbesserte die Haftzugfestigkeiten. Die Hinterfüllmörtel der Vorversuche wiesen Festigkeiten auf, die mit Kalkmörteln vergleichbar, z. T. auch niedriger waren. Die zwei geeignetsten Hinterfüllmörtel der Voruntersuchungen wurden an Musterflächen des ehemaligen Zisterzienserklosters in Heydau appliziert und 12 Monate später auf ihren Verbund hin geprüft. Er erwies sich bei allen untersuchten Materialien (Sandstein, Gips, Lehm) als gut. Im Rahmen der Hauptversuche kamen die zwei geeignetsten Bindemittel (HGZ, HOZ+) der Vorversuche sowie ein hochfein gemahlener HOZ

(Mikro), dessen hoher Sulfatwiderstand in Vorversuchen (Kapitel 5.4.3.3) ermittelt wurde, zum Einsatz. Die Zusammensetzung der drei Bindemittel war:

- **HGZ** mit 83 M.-% Hüttensand (HüS), 10 M.-% gemahlenem Naturgips (G) und 7 M.-% Portlandzement (PZ)
- **HOZ+** mit 70 M.-% Hochofenzement HS (HOZ) und 30 M.-% Kalksteinmehl (KStM)
- **Mikro** ein hochfein gemahlener gesichteter Hochofenzement

Die Frischmörteleigenschaften der Mörtel mit diesen Bindemitteln wurden durch Variation der Zusätze Borosilikat-Vollglaskugeln (BVK), Borosilikat-Hohlglaskugeln (HGK), Polyisocyanat (PUR), Methylhydroxyethylcellulose (MC), Kunststoffdispersion flüssig (Kd L) und Kunststoffredispersionspulver (Kd P) an insgesamt 111 Mischungen hinsichtlich des Penetrationsverhaltens optimiert. Die Einflüsse der Zusätze auf das Fließverhalten und Sedimentationsverhalten wurden registriert. Dabei konnte das schon gute Penetrationsverhalten der Mörtel der Voruntersuchungen weiter verbessert werden, so daß ein problemloses Einbringen der Hinterfüllmörtel gewährleistet ist.

Der Einfluß des Zusatzes von zwei Kunststoffdispersionen (Kd L bei HGZ, HOZ+ und Kd P bei Mikro) sowie unterschiedlicher Gehalte an PUR (0; 4; 7,5; 10; 12,5; 15 M.-%) auf die Festmörteleigenschaften sollte an den optimierten Hinterfüllmörteln untersucht werden.

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte abweichend von den Vorversuchen mit einem Ausbreitmaß von $17,5 \pm 0,5$ cm. Grund hierfür war das Ausbreitmaß von 13-17 cm, das sich bei den Hinterfüllmörteln ca. 15 Minuten nach der Applikation zwischen Sandsteinplatten einstellte.

Die Festmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel wurden in der in Tabelle 10 aufgeführten Weise durch die Zusätze beeinflusst.

Ursache für die Eigenschaftsänderungen der Hinterfüllmörtel ist die durch die Zusätze PUR, Kd L und Kd P veränderte Porenstruktur. Die mittleren Porenradien verschieben sich hin zu größeren Werten. Dabei kann die Zunahme bis zu 11fach höhere Werte (HGZ) erreichen.

Tabelle 10: Übersicht über die Einflußtendenzen der Zusätze Kd L, Kd P und PUR auf die untersuchten Festmörteleigenschaften

Untersuchung	PUR	Kd	vorwiegende Beeinflussung
E_{dyn}	↓	↓	PUR
β_D	↓↑	↓	PUR - Kd
β_{BZ}	↑	↑	Kd
β_{HZ}	↑	↑	Kd
ϵ_{s1}	↑↓	↓↑	PUR
ϵ_q	↑	↑	PUR
ϵ_{s2}	↑	↑	PUR
μ -Wert	↓	↓	PUR
ω	↓↑	↓↑	PUR
w_{ak}	↑	↓↑	PUR
Sorptionsfeuchte	↓	↓	PUR
Sorptionsdehnung	↑	↑	PUR
α_T	↑	↑	PUR
mittl. Porenradius	↑	↑	PUR

↓ erniedrigt den Kennwert gegenüber der Probe ohne Zusatz, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↑ erhöht den Kennwert gegenüber der Probe ohne Zusatz, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↓↑ keine klaren Tendenzen erkennbar

Viele Eigenschaftsänderungen der untersuchten Hinterfüllmörtel weisen gute Korrelationen mit den Veränderungen der mittleren Porenradien auf, wie die E-Moduln, die Druckfestigkeiten, die Wasseraufnahmekoeffizienten, die Wasserabgabekoeffizienten, die μ -Werte und die inneren Oberflächen.

Durch die Zusätze werden die Eigenschaften der Hinterfüllmörtel so weit verändert, daß sie zum Teil mit den Eigenschaften von Kalkmörteln übereinstimmen, wie Tabelle 11 am Beispiel von Hinterfüllmörteln auf Basis HGZ und HOZ+ im Vergleich zu Kalkmörteln und dem Anforderungsprofil zeigt. Keine Übereinstimmung mit im Labor hergestellten Kalkmörteln weisen die hygrischen Dehnungen der Hinterfüllmörtel auf; hier stehen auch keine Kennwerte historischer Mörtel zur Verfügung. Der PUR-Einsatz sollte aufgrund der Untersuchungen auf Zusatzmengen von 4 M.-% beschränkt bleiben, da andernfalls zu hohe hygrische Dehnungen die Folge sind, die beim Quellen zu irreversiblen Veränderungen führen.

Tabelle 11: Festmörteleigenschaften geeigneter Hinterfüllmörtel im Vergleich zu Kalkmörteln und historischen Kalkputzen

Mörtel	E_{dyn} / kN/mm ²	β_D / N/mm ²	β_{HZ} / N/mm ²	ω / kg/(m ² ·√h)	W_{ak} / kg/(m ² ·h)	μ / -	ϵ_{s1} / mm/m	ϵ_q / mm/m	ϵ_{s2} / mm/m
Kalk ¹¹⁶	3,3-19	1-14	0,03-0,15	1,6-20	0,03-0,07	11-20	-0,11- -1,88	0,07- 0,17	-0,06- -0,11
hist. Kalk	6,7	1-4	0,03	4-13	0,02- 0,55	14-21	-	-	-
Anforderungsprofil	< 10	> 2 < 15	> 0,2	0,5-10	0,1-0,2	<50	möglichst klein		
HGZ1 Kd	11,4	19,9	0,95	1,6	0,10	48	-2,55	0,29	-0,27
HGZ2 Kd	4,4	4,2	0,74	8,6	0,19	10	-1,74	1,47	-1,23
HOZ1 Kd	10,8	25,3	1,19	3,2	0,09	20	-2,55	0,29	-0,81
HOZ2 Kd	6,8	12,9	1,18	1,1	0,05	45	-3,19	1,15	-1,36

Die Hinterfüllmörtel auf Basis Mikro scheiden bei der Restaurierung von Kalkmörteln aus, da sie einerseits zu hohe Festigkeiten aufweisen. Andererseits enthalten sie sehr hohe Sulfatgehalte, was zu Ausblühungen und zu später Ettringitbildung führen kann, obwohl ein hoher Sulfatwiderstand an einer Voruntersuchung festgestellt werden konnte. Selbst bei der Annahme, daß hier ein Fabrikationsfehler vorgelegen hat, ist dies allein der Anlaß, bei der Restaurierung historischer Gebäude auf den Einsatz dieses Materials zu verzichten.

Die Hinterfüllmörtel auf Basis HGZ und HOZ weisen keine Neigung zu Ausblühungen auf. Ein ausreichender Frost-Tauwechsel-Widerstand aller untersuchten Mörtel konnte festgestellt werden.

Die Hinterfüllmörtel können, entsprechend den geforderten Eigenschaften aus der Untersuchung der historischen Putzen, an die historische Substanz angepaßt werden. Die Untersuchungen zeigen, welche Maßnahmen getroffen werden können, um die Eigenschaften der Hinterfüllmörtel an die Altsubstanz anzupassen. Die Zugabe von PUR ermöglicht sogar die gezielte Anpassung der Sorptionsdehnungen an Lehmausfuchungen.

Erfolgreich verlief die Applikation von Musterflächen an verschiedenen Bauwerken, z. B. dem ehemaligen Zisterzienserkloster Heydau in Morschen, der Einhardbasilika in Steinbach, dem Magdeburger Dom und dem Schweriner Schloß. Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit und durch die MPA Bremen konnten den guten Verbund der

¹¹⁶ aus: HOFFMANN 1992, Tabelle 19, S. 36 ; BÖTTGER 1994, Tabelle 4, S. 23 ; BOENKENDORF 1995, Anhang A3, S. 107

Hinterfüllmörtel mit den Kontaktflächen nachweisen. Dies gilt auch für problematische Untergründe wie Gips, sulfatbelastete Putzgründe und Lehm.

7 Entwicklung von Kalkputzen für die Restaurierung historischer Kalkputze

7.1 Einleitung

Im Restaurierungskonzept dieser Arbeit sollen auch Kalkputze entwickelt werden, mit denen Fehlstellen an historischen Putzen restauriert werden können. Die Möglichkeit der Einflußnahme auf die Eigenschaften von Kalkputzen durch gezielte Veränderung unterschiedlicher Parameter soll untersucht werden.

Geschädigte Putze historischer Bauwerke sollen in vielen Fällen erhalten werden. Dies stellt hohe Anforderungen an Ersatz- bzw. Ergänzungsputze. Einer Restaurierung historischer Kalkputze im Innen- und Außenbereich sollte in jedem Falle eine gründliche Untersuchung der Altsubstanz vorweggehen. Hinweise auf erforderliche Untersuchungen gibt KNÖFEL 1993 und ergeben sich aus Kapitel 1 dieser Arbeit.

Kalkputze sollten wegen der hohen SO_2 -Gehalte der Atmosphäre möglichst geringe Magnesiumgehalte (Dolomit) aufweisen, da die sich bildenden Magnesiumsulfate zum einen sehr gut wasserlöslich sind und durch Lösungs- und Kristallisationsvorgänge Schäden verursachen können, zum anderen aber auch verschiedene Hydratationsphasen existieren. Die durch Wasseraufnahme verursachten Hydratationsdrücke können Schäden hervorrufen, siehe auch Kapitel 2.1.2.2. CANCRIN 1790 und BERTRAM 1956 sprechen dolomithaltigen Kalken eine schnellere Erhärtung und bessere Verarbeitbarkeit zu. Angesichts der möglichen Schäden sollte Abstand vom Einsatz dolomithaltiger Kalke genommen werden.

Für die Entwicklung Ersatzmörtel gibt es zwei Wege, um zu einer befriedigenden Lösung zu kommen. Zum einen können die aus der Voruntersuchung der historischen Kalkputze resultierenden technologischen Anforderungen über die Konzeptionierung moderner Mörtel durch gezielte Veränderung unterschiedlicher Parameter erzielt werden, wie dies z. B. von SCHÄFER 1993a vorgeschlagen wird, zum anderen über die genaue Nachstellung der historischen Mörtel.

Die reine Nachstellung von Kalkmörtel wird von NIESEL 1994 kritisch gesehen, da der Einfluß der verschiedenen Parameter auf die Eigenschaften der Kalkmörtel noch nicht endgültig geklärt ist. KÜNZEL 1996 hält sie gar für unmöglich.

Technologische und hygri sche Kennwerte historischer Mörtel mit Kalkspatzen sind zunehmend in jüngerer Literatur zu finden (BÖTTGER 1993c, MALINOWSKI 1993, LINDQVIST 1994 und BOENKENDORF 1995). Innerhalb der Untersuchungen dieser Arbeit konnten die in Kapitel 1 beschriebenen Putzmörtel unterschiedlicher historischer Bauwerke hinsichtlich der Mörtelzusammensetzung, der Bindemittelart und, soweit möglich, der technologischen und hygri schen Eigenschaften geprüft werden. Die Putzmörtelzusammensetzung von 34 Proben und die hygri schen Daten von 21 Proben von drei Objekten, nämlich der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika in Steinbach und des Magdeburger Domes, konnten bestimmt werden.

Die chemisch-mineralogischen Untersuchungsergebnisse lieferten die Basis für die Zusammensetzung der nachgestellten Sandkalkmörtel. So wurden für die Herstellung der verschiedenen Mörtel Sande der Zusammensetzung verwendet, wie sie sich im Mittel aus den Analysen für die historischen Mörtel aus der Torhalle in Lorsch und der Einhardbasilika in Steinbach ergeben. Der Bindemittelanteil und die Lagerungsbedingungen wurden in den Testreihen variiert. Bei der Planung der Lagerung der Mörtel wurden die Ergebnisse anderer Autoren berücksichtigt (PIEPENBURG 1951, HENKEL 1955, NEY 1967 und HOFFMANN 1994). Sie erfolgte im wesentlichen an Luft sowie in mit 1 Vol.-% CO₂ angereicherter Atmosphäre mit unterschiedlicher Wasserzwischenlagerung.

Ziel dieses Teiles der Arbeit ist die Prüfung der Eigenschaften nachgestellter Sandkalkmörtel, die nach dem von KRAUS 1989 beschriebenen Verfahren gelöscht und hergestellt wurden. Mörtel dieser Herstellungsart enthalten in der Regel, wie die untersuchten historischen Mörtel, 3-5 M.-% Kalkspatzen. Der Vorteil trocken gelöschter Kalkmörtel oder auch Sandkalkmörtel ist ein wesentlich reduziertes Schwinden, was beispielhaft von KRAUS 1989 und KNÖFEL 1989 beschrieben wurde. Im Vergleich dazu sollen neben den Sandkalkmörteln auch Kalkmörtel mit handelsüblichem Weißkalkhydrat (WKH) sowie mit Verflüssiger modifiziertem WKH geprüft werden.

Die ermittelten Kennwerte sollen eine bessere Kenntnis über das Gefüge und die physikalisch-technologischen Merkmale von Sandkalk- und Kalkmörteln gestatten, um eine möglichst gute Anpassung an den verbliebenen Originalbestand, wie z. B. auch von NIESEL 1994 gefordert, zu ermöglichen. Es sollen also die Eigenschaften trocken gelöschter Sandkalk-, und mit WKH hergestellter Kalkmörtel unterschiedlicher Zusammensetzung vorgestellt und im Vergleich zu den historischen Vorlagen mit ihren heutigen Eigenschaften diskutiert werden. Die geplanten Untersuchungen versuchen einen Beitrag zur besseren Kenntnis der Eigenschaften von Kalkmörteln und Sandkalkmörteln zu liefern.

7.2 Anforderungsprofil an die Kalkputze

Die Anforderungen an Kalkputze ergeben sich aus den Eigenschaften der untersuchten historischen Putze. Die Ersatzputze können vergleichbare oder auch niedrigere Festigkeiten, wie Druckfestigkeit und E-Modul, erreichen, sollten aber nach Möglichkeit etwas höhere Haftzugfestigkeiten aufweisen. Die hygrischen Eigenschaften sollten an die Altsubstanz angepaßt sein.

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Kalkputze können niedriger als bei den historischen Putzen sein, wenn niedrigere oder vergleichbare μ -Werte vorliegen. Ein wichtiges Kriterium ist das Austrocknungsverhalten, das bei den Ersatzputzen besser oder

mindestens vergleichbar mit den historischen Vorlagen sein sollte. Dies führt zu einer gleichmäßigen Austrocknung des gesamten Putzes. Die schnellere Trocknung der Ersatzputze führt zu einem Transport ggf. vorhandener Salze aus den historischen Mörteln in die Ersatzmörtel.

Diese Vorgehensweise bedingt, daß die Mörtel des zu restaurierenden Gebäudes in jedem Fall geprüft werden müssen; das Anforderungsprofil sollte gemäß den Untersuchungsergebnissen erstellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird aus diesem Grunde kein besonderes Anforderungsprofil an die Ersatzputze gestellt. Die Ergebnisse werden jedoch mit den historischen Vorlagen verglichen.

7.3 Verwendete Materialien

7.3.1 Bindemittel

Im Rahmen der Untersuchung von Sandkalk- und Kalkmörteln kamen folgende Bindemittel zum Einsatz:

CL90/1 Branntstückkalk CL 90, 1. Lieferung

CL90/2 Branntstückkalk CL 90, 2. Lieferung

CL90/3 Branntstückkalk CL 90, 3. Lieferung

WKH Weißkalkhydrat CL 90/H

Der verwendete Branntstückkalk wies einen CaO-Gehalt von > 98 M.-% auf. Eine Löschtemperatur von 60°C wird nach Angaben des Herstellers bei Prüfung nach DIN 1060 nach 1-2 Minuten erreicht. Der Branntkalk wurde vor Herstellung der Sandkalkmörtel in einem Backenbrecher gebrochen. Der Korngrößenbereich des gebrochenen Materials umfaßte 0-30 mm. Die Analysen der verschiedenen Branntstückkalken und des Weißkalkhydrates (CL90/H) sowie die Sieblinie des CL90/H sind den Tabellen A14 und A15 im Anhang zu entnehmen.

7.3.2 Zuschlag

Als Zuschlag für die Kalkmörtel sollten Sande mit einer mittleren Zusammensetzung der historischen Putze der Torhalle in Lorsch (Sand L-IST) und der Einhardbasilika in Steinbach (Sand S-IST) verwendet werden. Die Zusammensetzung, die Korngrößenverteilung und die Körnungsziffern sind Tabelle A42 im Anhang zu entnehmen.

Zur möglichst genauen Nachstellung der Sieblinie der historischen Putzmörtel war es erforderlich, die Sieblinie aus verschiedenen Quarzsanden unterschiedlicher Korngröße und Korngrößenverteilung zusammenzusetzen. Der Kornanteil < 63 µm bestand

beim Sand L-IST ausschließlich aus zugefügtem Kaolinit (1,36 M.-%), während beim Sand S-IST diese Fraktion als Quarzmehl zugegeben wurde. Die unterschiedliche Vorgehensweise orientiert sich an den historischen Zuschlägen. Die Zuschläge der historischen Putze der Torhalle in Lorsch enthielten Tonminerale, die der Einhardbasilika in Steinbach nicht. Die nachgestellten Sande L-IST und S-IST wiesen die im Bild 41 dargestellte Kornverteilung auf; ihr Feinanteil war gegenüber heutigen Bausanden deutlich erhöht. Bild 41 enthält als Vergleich die Kornverteilung von handelsüblichem Bausand (Rheinsand), dessen geringerer Feinanteil sich auch beim Vergleich der k' -Werte bemerkbar macht, die in Anlehnung an die Berechnung der k' -Werte für Betonzuschläge festgestellt wurden. Die k' -Werte der historischen Sande Steinbach und Lorsch liegen bei 2,44 bzw. 2,59, der eines üblichen Bausandes, hier Rheinsand (0-2 mm) bei 3,75.

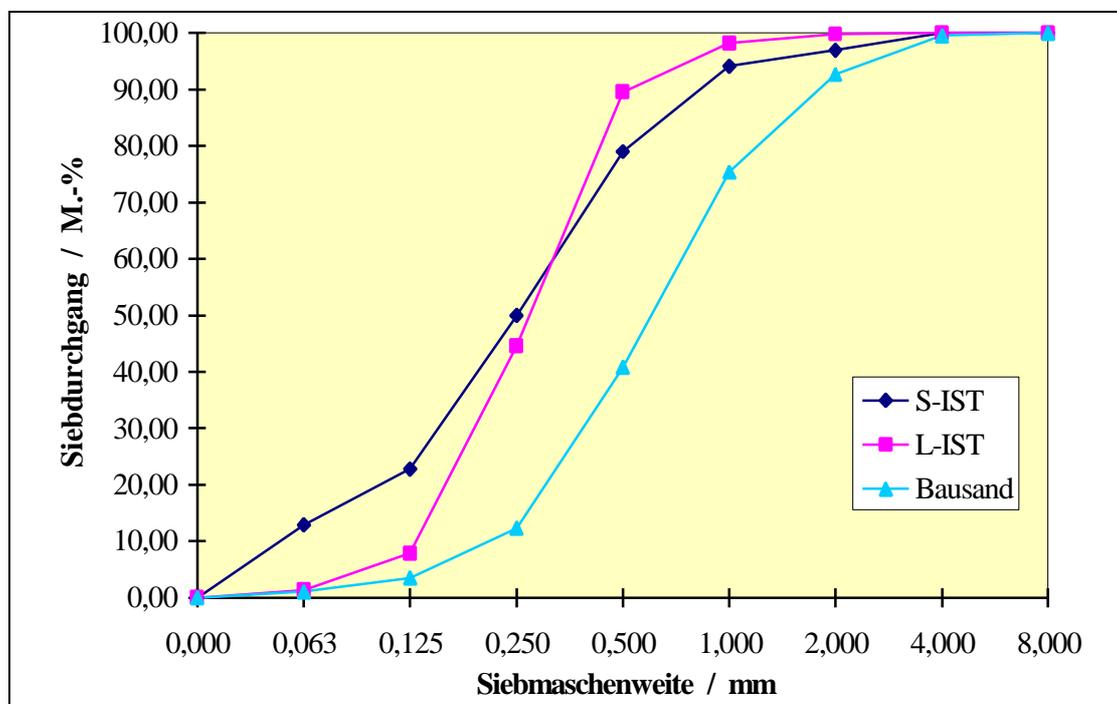


Bild 41: Siebdurchgang der nachgestellten Sande L-IST und S-IST. Die Kornverteilung eines handelsüblichen Bausandes (Rheinsand) steht zum Vergleich.

7.3.3 Zusätze

Als Zusatz kam ein Fließmittel (F10) auf Basis eines Melaminharzes zur Anwendung. Es soll nach Angaben des Herstellers für den Einsatz bei Kalkmörteln besonders geeignet sein.

7.3.4 Zusammensetzung der Sandkalkmörtel und Kalkmörtel

Die Zusammensetzung der Sandkalkmörtel und Kalkmörtel orientiert sich an den Untersuchungsergebnissen des Kapitels 1. So kamen zwei Zuschläge zum Einsatz, die dem Mittel der historischen Putze der Torhalle in Lorsch (L-IST) und dem Mittel der Einhardbasilika in Steinbach (S-IST) entsprachen. Zudem wurden die mittleren Bindemittelgehalte der historischen Putze verwendet.

Der Begriff **Sandkalkmörtel** wird für die Mörtel verwendet, die nach dem von KRAUS 1989 beschriebenen historischen Löschverfahren hergestellt werden. Mit der Bezeichnung **Kalkmörtel** sind alle mit WKH hergestellten Mörtel gemeint. Der Begriff Kalkputz wird als Sammelbegriff für beide Mörtel verwendet.

Für die Herstellung der verschiedenen Mörtel wurden die folgenden Kürzel, Bindemittel, Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse (B/Z), Zuschläge und Ausbreitmaße (AM) verwendet:

- L** CL90/1 mit Zuschlag L-IST, B/Z **1:3,5** und 1:4,5, AM $12 \pm 1,0$ cm
- S** CL90/2 mit Zuschlag S-IST, B/Z **1:1,85**; 1:2,35; 1:2,85; 1:3,35; 1:3,85, AM $12 \pm 1,0$ cm
- B** CL90/1 mit Zuschlag S-IST, B/Z **1:1,85**; 1:2,85; 1:3,85, AM 12,0; 14,0; $17,0 \pm 0,5$ cm
- K** WKH mit Zuschlag S-IST, B/Z **1:1,85**; 1:2,85; 1:3,85, AM 12,0, $17,0 \pm 0,5$ cm
- K+** WKH mit Zusatz von 1 M.-% Fließmittel F10 mit Zuschlag S-IST, B/Z **1:1,85**; 1:2,85; 1:3,85, AM 12,0; $17,0 \pm 0,5$ cm

Die angegebenen B/Z-Verhältnisse beziehen sich zur vereinheitlichten Bezeichnung auf CaO als Bindemittel. Die fett gedruckten Werte entsprechen dem Mittel der historischen Vorlagen aus der Torhalle in Lorsch und der Einhardbasilika in Steinbach, sie sind den historischen Putzen exakt nachgestellt. Die genaue Zusammensetzung der Mörtel ist Tabelle A43 im Anhang zu entnehmen. Dort sind die eingesetzten Bindemittelgehalte sowohl für CaO als auch für $\text{Ca}(\text{OH})_2$ angegeben.

Die Verwendung von Kalk ohne hydraulische Anteile als Bindemittel für Ersatzputze hat den Vorteil, daß im Vergleich zu hydraulischen Bindemitteln (hydraulische Kalke, Zement) nur äußerst geringe Mengen an Alkalien an das historische Bauwerk kommen und der Sulfatwiderstand sehr hoch ist. Die Alkaligehalte des verwendeten CL 90 betragen maximal 0,05 M.-%.

7.3.5 Herstellung der Sandkalkmörtel

Bei der Herstellung der Sandkalkmörtel wird der Zuschlag mit 110 M.-% der stöchiometrisch benötigten Wassermenge¹¹⁷ zum Löschen des Branntkalkes versetzt und schichtig mit dem gebrochenen Branntkalk in ein verschließbares Blechgefäß gefüllt. Anschließend wird das Gefäß lose abgedeckt, damit möglichst wenig Wasser-

¹¹⁷ Die stöchiometrisch benötigte Menge Wasser zum Löschen des Branntkalkes beträgt 32,1 M.-%.

dampf während des Löschens entweichen kann. Die Reaktion von CaO zu Ca(OH)_2 ist ein exothermer Vorgang es können hohe Temperaturen entstehen.

Bei diesem Verfahren wird der Branntkalk langsam gelöscht. Die Sandkalkmörtel werden ca. 4 Tage nach Beginn der Löschvorganges 10 Minuten im Turbula-Mischer, System Schatz, der Fa. Claus homogenisiert.

Diese Trockenmörtel wurden unter Wasserzugabe auf die jeweiligen Ausbreitmaße eingestellt und 7 Tage in luftdicht schließenden Behältern gelagert, um ggf. noch vorhandene ungelöschte Partikel im Mörtel auszuschließen.

Beim Löschen des Branntstückkalkes CL90/2 waren die bei diesem Löschverfahren entstehenden Kalkspatzen z. T. sehr hart. Sie ließen sich nicht mit dem Fingernagel ritzen und beeinträchtigten deshalb auch ein wenig die Verarbeitungseigenschaften. Die teilweise bis 5 mm großen harten Kalkspatzen hinterließen beim Glätten von Putzflächen in der Einhardbasilika in Steinbach Kratzspuren.

Als Gründe für dieses unterschiedliche Löschverhalten kommen zwei Möglichkeiten in Betracht. Zum einen können nach POHL 1955 leicht erhöhte Sulfatgehalte der Mörtel beim Löschen zur Entstehung von Grieß führen. Zum anderen kann es nach POHL 1956 und SCHWEDEN 1973 bei weich gebranntem Material zu Agglomerationen kommen, „die so groß werden können, daß sie mechanisch sogar schwierig zu zerstören sind.“¹¹⁸ Bedingung für die Bildung der Agglomerate ist die Dampfbildung des Löschwassers, was bei dem gewählten Löschverfahren anzunehmen ist.

SCHWEDEN 1973 nennt als weitere Möglichkeit, „daß extremer Weichbranntkalk ohne Änderung der äußeren Form des vorher vorhandenen Branntkalkkornes vollständig hydratisieren kann“¹¹⁸; dieses Hydrat kann körnig und hart sein. Sehr weich gebrannter Kalk kann eine Porosität von ca. 50 Vol.-% besitzen, die bei der Bildung des Hydrates vollständig ausgefüllt wird.

Beim verwendeten Branntstückkalk (CL90/2) handelt es sich um weichgebranntes Material, das einen leicht erhöhten Sulfatgehalt von 0,14 M.-% gegenüber 0,03 M.-% des CL90/1 bzw. CL90/3 aufwies. Dies dürfte nach POHL 1955 nicht ausreichen, um Grieß zu bilden. Möglicherweise addieren sich die Einflüsse beider Reaktionen.

7.3.6 Herstellung der Kalkmörtel

Die Kalkmörtel wurden in Anlehnung an DIN EN 196 Teil 1 hergestellt. Abweichend von der Norm war die Verwendung der zuvor beschriebenen Zuschläge L-IST und S-IST.

Für die Mörtel mit Fließmittelzusatz wurde das Fließmittel zunächst im Zugabewasser gelöst, danach folgten die nach Norm erforderlichen Arbeitsschritte. Die durch das Fließmittel bedingte Reduzierung der Zugabewassermenge und damit des W/B-Wertes wurde registriert.

¹¹⁸ SCHWEDEN 1973: S. 338

7.3.7 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper, Anlage von Musterflächen

Das Einformen und die Verdichtung der verschiedenen Mörtel zur Herstellung der Normprismen und Wasserdampf-Diffusionsplatten erfolgte nach DIN EN 459-2 nach dem Vibrationsverfahren.

Die Lagerung der Normprismen und Wasserdampf-Diffusionsplatten erfolgte bis zum Ausformen im Alter von 7 Tagen in der Form im Normklima DIN 50014-20/65-2.

Zur Herstellung und Lagerung der Mörtel-Verbundkörper wurden sandgestrahlte Beton-Gehwegplatten der Maße 30x30x5 cm verwendet. Die Herstellung erfolgte in Anlehnung an DIN 18555, Teil 6. Die Gehwegplatten wurden ca. 30 Minuten vor dem Aufbringen des Frischmörtels 1 Minute lang in Wasser gelagert, um eine praxisnahe Befeuchtung der Oberfläche zu erhalten. Die hergestellten Verbundkörper lagerten zunächst 7 Tage im Normklima DIN 50014-20/65-2. Dem schlossen sich verschiedene Lagerungen an, die wie folgt variierten:

- **Lagerung a** - im Normklima DIN 50014-23/50-2, bis zur Prüfung nach 28 Tagen.
- **Lagerung b** - 90tägige Lagerung in mit 1 Vol.-% CO₂ angereicherter Atmosphäre, im Normklima DIN 50014-23/65-2. Ab dem 10. Tag wurden die Proben zweimal wöchentlich 30 s gewässert.
- **Lagerung c** - 180tägige Lagerung der Proben, die Lagerungsbedingungen entsprechen der Lagerung b, jedoch wurden die Mörtel statt 30 s - 30 min in Wasser gelagert.
- **Lagerung d** - Die Versuchflächen wurden an einer Wand in der Einhardbasilika in Steinbach (EB) bzw. der Torhalle in Lorsch (TL) appliziert. Die Prüfung erfolgte nach einem Jahr.

Standardlagerungen waren Lagerung a und b. Lagerung c wurden nur an Sandkalken mit dem Zuschlag L-IST durchgeführt. Applikationen vor Ort wurden nur mit ausgesuchten Mörteln durchgeführt.

7.3.8 Untersuchungsmethoden

Frischmörtelprüfungen

Die Mörtel wurden den folgenden Frischmörtelprüfungen unterzogen:

- Konsistenz über Ausbreitmaß; siehe Kapitel 3.2.1, Seite 50
- Wasseranspruch für verschiedene Ausbreitmaße; siehe Kapitel 3.2.1, Seite 50
- Frischmörtelrohddichte; siehe Kapitel 3.2.6, Seite 51
- 1. Schwinden der Sandkalkmörtel in der Form; siehe Kapitel 3.3.2.1, Seite 53

Festmörtelprüfungen

- hygri-sche Dehnung: 1. Schwinden, Quellen, 2. Schwinden, siehe Kapitel 3.3.2.2, Seite 54
- Festmörtelroh-dichte, Lagerung a, b und c, DIN EN 1015 Teil 10
- Dynamischer E-Modul; Lagerung a, b, c, siehe Kapitel 3.3.1.1, Seite 52
- Biegezugfestigkeit; Lagerung a, b und c, siehe Kapitel 3.3.1.2, Seite 52
- Druckfestigkeit; Lagerung a, b, c und d, siehe Kapitel 3.3.1.3, Seite 52
- Zugfestigkeiten; Lagerung a, b und c, siehe Kapitel 3.3.1.5, Seite 53
- Haftzugfestigkeiten; Lagerung d, siehe Kapitel 3.3.1.4, Seite 52
- Sorptionsfeuchten und Sorptionsdehnungen; Lagerung a, b, siehe Kapitel 3.3.2.4, Seite 55
- Wasseraufnahmegrad; Lagerung a, b, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56
- Wasseraufnahmekoeffizient; Lagerung a, b, siehe Kapitel 3.3.2.6, Seite 56
- Wasserabgabegrad; Lagerung a, b, siehe Kapitel 3.3.2.7, Seite 56
- Austrocknungsverhalten; Lagerung a, b, siehe Kapitel 3.3.2.7, Seite 56
- Wasserdampf-Diffusion; Lagerung a, b, siehe Kapitel 3.3.2.3, Seite 54
- innere Oberfläche; Lagerung a, b, siehe Kapitel 3.3.2.43.3.2.5 Seite 55
- Wärmedehnungskoeffizient; Lagerung b, siehe Kapitel 3.3.6, Seite 60
- Frost-Tauwechsel-Verhalten; Lagerung b, siehe Kapitel 3.3.1.6, Seite 53
- Ausblühverhalten; Lagerung b, siehe Kapitel 3.3.3, Seite 59
- Gesamtporosität, Porenverteilung; Lagerung a, b siehe Kapitel 3.3.5, Seite 59
- Bestimmung des Kalkspatzen-Anteils; siehe Kapitel 3.4.6, Seite 62
- Untersuchungen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM); Lagerung a, b, Kapitel 3.4.5, Seite 62

7.4 Untersuchungsergebnisse

7.4.1 Frischmörteluntersuchungen

Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen sind der Tabelle A43 im Anhang zu entnehmen. Die Frischmörteleigenschaften der Mörtel sind abhängig vom Bindemittel, vom B/Z, vom Fließmittel, von der Zugabewassermenge und vom verwendeten Sand. Tabelle 12 stellt die Einflüsse der aufgezählten Variablen zusammenfassend dar. Sandkalkmörtel weisen in der Regel einen geringeren Wasseranspruch (WA) auf, niedrigere Frischmörtelroh-dichten und ein niedrigeres Schwinden. Der Wasseranspruch der bis auf das Bindemittel identischen Sandkalk S1, S3, S5 (CL90/2) ist niedriger als bei B1, B4 und B7 (CL90/3). Ursache hierfür ist das unterschiedlich ablöschende Bindemittel, das bei den Mörteln S1 - S5 zur Ausbildung sehr dichter Kalkspatzen geführt hat, die weniger Wasser bei der Mörtelherstellung aufnehmen.

Tabelle 12: Einflüsse des Bindemittels (Sandkalk), Bindemittelgehalte (B/Z 1:1,85), niedriger Ausbreitmaße (12 cm), des Zuschlages S-IST und

des Fließmittelzusatzes (WKH) auf die Frischmörteleigenschaften und der Bereich, in dem sich die Werte aller Mörtel bewegen

	Binde- mittel	B/Z	Ausbreit- maß	Fließ- mittel	Zu- schlag	Bereich aller Mörtel
WA / M.- %	↓↑	↑	↓	↓	↓	14,6-28,1
W/B / -	↓↑	↓	↓	↓	↓	0,65-1,04
ρ_f / g/cm ³	↓↑	↓	↑(↓)	↑	↑	1,81-2,05
ε_f / mm/m	↓	↑(↓)	↓	↓	↓	-6,4--31,0

↓ erniedrigt den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↑ erhöht den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↓↑ keine klaren Tendenzen erkennbar

Hohe Bindemittelgehalte (B/Z) reduzieren den Wasseranspruch und damit den W/B-Wert, dies deckt sich mit Ergebnissen von SCHÄFER 1993a. Sie verringern die Frischmörtelrohddichte und erhöhen das 1. Schwinden, als Schwinden in der Form bestimmt. Es ist bei Sandkalkmörteln (10-13 mm/m) geringer als bei Kalkmörteln (bis zu 31 mm/m) und folgt aus der Abgabe des Zugabewassers (WOLTERS 1870).

Mit dem Ausbreitmaß steigt der WA, das W/B-Verhältnis sowie das Schwinden in der Form, die Frischmörtelrohddichte sinkt.

Die Verwendung des Fließmittels verbessert viele Eigenschaften der Kalkmörtel. So wird der WA (8-14 %) und der W/B-Wert gesenkt, die Frischmörtelrohddichte steigt, das Schwinden in der Form sinkt. Die Wasserreduzierung ist bei hohem Ausbreitmaß (17 cm) am größten.

Der Wasseranspruch ist bei Mörteln mit dem Sand Lorsch höher als bei den Mörteln mit dem Sand Steinbach. Ursache hierfür kann aufgrund der Versuchsbedingungen nur die unterschiedliche Kornverteilung und Zusammensetzung der Sande sein. Dies ist, neben dem Einfluß der Bindemittel, möglicherweise ein Grund für den höheren Wasseranspruch der Kalkmörtel, den andere Autoren (VAN BAALEN 1991, SCHÄFER 1993a und STRÜBEL 1992) beschreiben.

7.4.2 Festmörteluntersuchungen

7.4.2.1 Mechanische Eigenschaften

Die Festmörteleigenschaften der Kalkputze sind abhängig von den in Tabelle 13 aufgezählten Faktoren und lassen die dort aufgeführten Tendenzen erkennen. Im einzelnen sind bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften die in den Tabellen A45-A46 im Anhang stehenden Ergebnisse angefallen.

Tabelle 13: Einflüsse des Bindemittels (Sandkalk), hoher Bindemittelgehalte (B/Z 1:1,85), niedriger Ausbreitmaße (12,0 cm), des Zuschlages S-IST und

des Fließmittelzusatzes (WKH) und der Carbonatisierung (Lagerung b) auf die mechanischen Eigenschaften und der Wertebereich aller Mörtel im angegebenen Alter oder von 90 Tagen

	Binde- mittel	B/Z	Ausbreit- maß	Fließ- mittel	Zu- schlag	Lage- rung b	Bereich aller Mörtel
ρ_{128} / g/cm ³	↑	↓	↑	↑	↑	↓	1,50-1,74
ρ_{1c} / g/cm ³	↑	↓	↑	↑	↑	↑	1,72-1,94
E_{dyn} / N/mm ²	↑	↓	↓	↑	↑	↑	6,3-15,8
β_{BZ} / N/mm ²	↑	↓↑	↑	↑	↑	↑	0,9-2,6
β_D / N/mm ²	↑	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	3,1-13,6
β_{HZ} / N/mm ²	-	↓	-	-	↑	↑	0,03-0,16
β_Z / N/mm ²	↑	↑	↓↑	↑	-	↑	0,05-0,71

↓ erniedrigt den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↑ erhöht den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↓↑ keine klaren Tendenzen erkennbar

Die Rohdichte der untersuchten Mörtel ist abhängig vom Bindemittel und bei Sandkalken (CL90/1, 2, 3) höher als bei WKH. Sie nimmt mit zunehmendem Bindemittelgehalt ab und bei kleiner werdenden W/B-Werten zu. Die Verwendung von Fließmittel führt zu reduziertem Wasseranspruch und damit zu höheren Rohdichten. Die Rohdichte der Mörtel nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Lagerungsdauer (Lagerung b, c) wegen der carbonatischen Erhärtung zu. Der Zuschlag S-IST bedingt niedrigere W/B-Werte und infolge dessen höhere Rohdichten.

Die Wandlung der verschiedenen Festigkeitsparameter wie Druck-, Biegezug-, Haftzug- und Zugfestigkeit sowie des E-Moduls in Abhängigkeit von den Veränderungen der Mörtelzusammensetzung verläuft in der Regel parallel, so daß im weiteren nur von Festigkeit gesprochen wird.

Die Mörtel mit dem Bindemittel Branntstückkalk führen zu größeren Streuungen der Ergebnisse. Ursache hierfür ist die Gegenwart der Kalkspatzen, die zu Prüfkörpern mit nicht ganz homogener Zusammensetzung führen. Bei den Kalkmörteln (Bindemittel WKH) treten solche Probleme nicht auf, da das Bindemittel homogen verteilt ist. Sandkalkmörtel (CL90/1, 2, 3) weisen nach 28 Tagen niedrigere oder vergleichbare, nach Lagerung b aber höhere Festigkeiten als Kalkmörtel auf. Dabei erzielt das Bindemittel CL90/2 besonders hohe Festigkeiten. Die Lagerungsart beeinflusst die Ergebnisse besonders stark. Die Festigkeiten der Mörtel steigen erwartungsgemäß mit zunehmendem Alter, siehe bei Bild 42 exemplarisch β_D . Lagerung c (180 Tage) führt zu höheren Festigkeiten als Lagerung b (90 Tage). Ähnlich große Beeinflussung der Festigkeit ist bei Zusatz von Fließmittel bzw. der Verwendung des Zuschlages S-IST festzustellen. Die Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung vom Zuschlag wird auch von anderen Autoren beschrieben (ZIER 1989, GÖDICKE 1995).

Die genannten Trends sind bei Lagerung b und c nicht so klar ausgeprägt, denn z. T. treten bei den niedrigen Bindemittelgehalten höhere Festigkeiten auf. Dies kann mit

unterschiedlich fortgeschrittenen Carbonatisierungs- und Umkristallisierungsvorgängen begründet werden. Die zügigere Carbonatisierung hängt von den höheren Wasseraufnahmekoeffizienten (ω) dieser Mörtel ab, siehe Kapitel 7.4.2.2, die, bedingt durch die Wasserzwischenlagerung, zu einer höheren Materialfeuchte führen. Nach HOFFMANN 1994 unterstützt eine Feuchte von 1-4 M.-% die Carbonatisierung. Dieser Einfluß wird deutlich bei Kalkmörteln mit und ohne Fließmittel (F10). Mörtel mit F10 weisen ein dichteres Gefüge auf, siehe Kapitel 7.4.2.10 und deshalb nicht so klare Abhängigkeiten der Festigkeiten von den genannten Parametern.

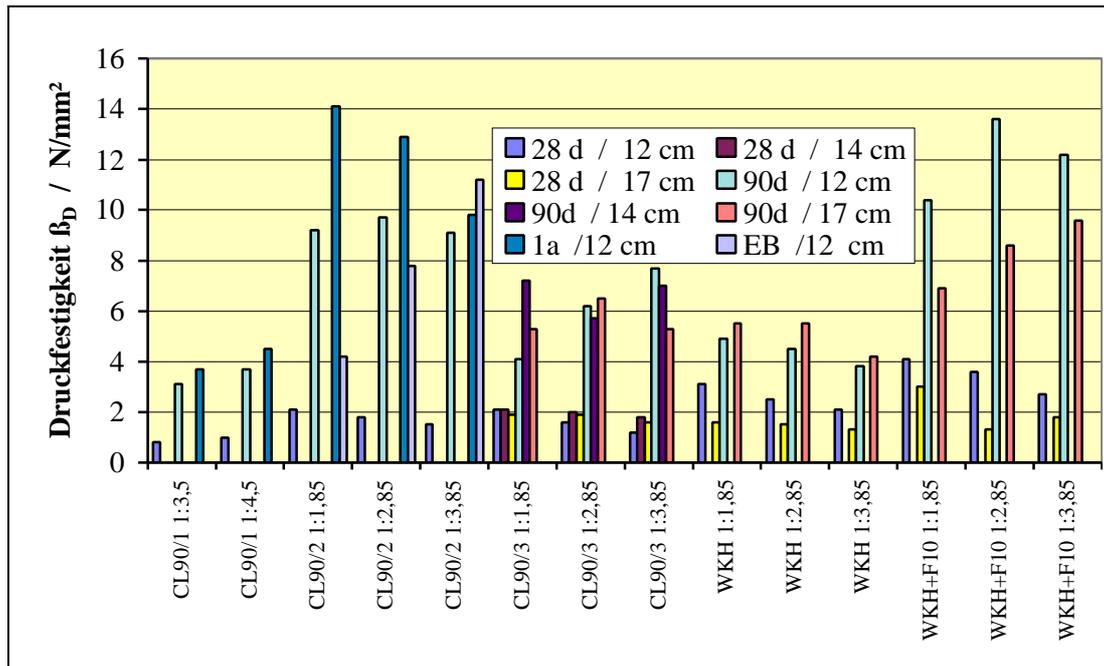


Bild 42: Festigkeiten der Sandkalk- und Kalkmörtel, abhängig vom Bindemittel, vom B/Z-Verhältnis, vom Ausbreitmaß und der Lagerungsart (Dauer)

Bei Lagerung d (1 Jahr Einhardbasilika Steinbach) verläuft die Festigkeitsentwicklung der Mörtel umgekehrt, siehe Bild 43. Mörtel mit niedrigem Bindemittelanteil erzielen um den Faktor 2 höhere Festigkeiten. Ursache dürfte der höhere CO_2 -Bedarf der Mörtel mit höherem Bindemittelgehalt bis zur völligen Carbonatisierung sein. Der Mörtel mit einem B/Z-Verhältnis von 1:1,85 erzielt bei Lagerung d mit den historischen Putzen vergleichbare Festigkeiten (Druckfestigkeit und E-Modul). Die Haftzugfestigkeiten der Sandkalkmörtel nach einjähriger Verweildauer vor Ort in der Einhardbasilika sind für Kalkmörtel mit 0,07-0,15 N/mm² sehr befriedigend.

Die Druckfestigkeiten sind insgesamt sehr hoch und überschreiten die von anderen Autoren (VAN BAALEN 1991, SCHÄFER 1993b) bestimmten Festigkeiten für Kalkmörtel deutlich, auch die von SCHÄFER 1993a angegebene theoretische Druckfestigkeit von Weißkalkmörteln mit 8 N/mm². Dabei fällt auf, daß hohe Festigkeiten insbe-

sondere bei CL90/2¹¹⁹ (Sandkalkmörtel S) und CL90/H + F10 (Kalkmörtel K+) auftreten. Die Festigkeitssteigerung der Kalkmörtel mit Fließmittel ist nach 90 Tagen 25-200 % höher als bei solchen ohne F10. Die Sandkalkmörtel weisen nach 28 Tagen bei niedrigen W/B-Werten geringere Festigkeiten als Kalkmörtel auf, nach 90 Tagen Lagerung b erzielen die Sandkalkmörtel stets höhere Druckfestigkeiten.

In Bild 43 sind die nach SCHÄFER 1993a berechneten Festigkeiten den gemessenen Festigkeiten am Beispiel der Sandkalkmörtel S1-S5 gegenübergestellt.

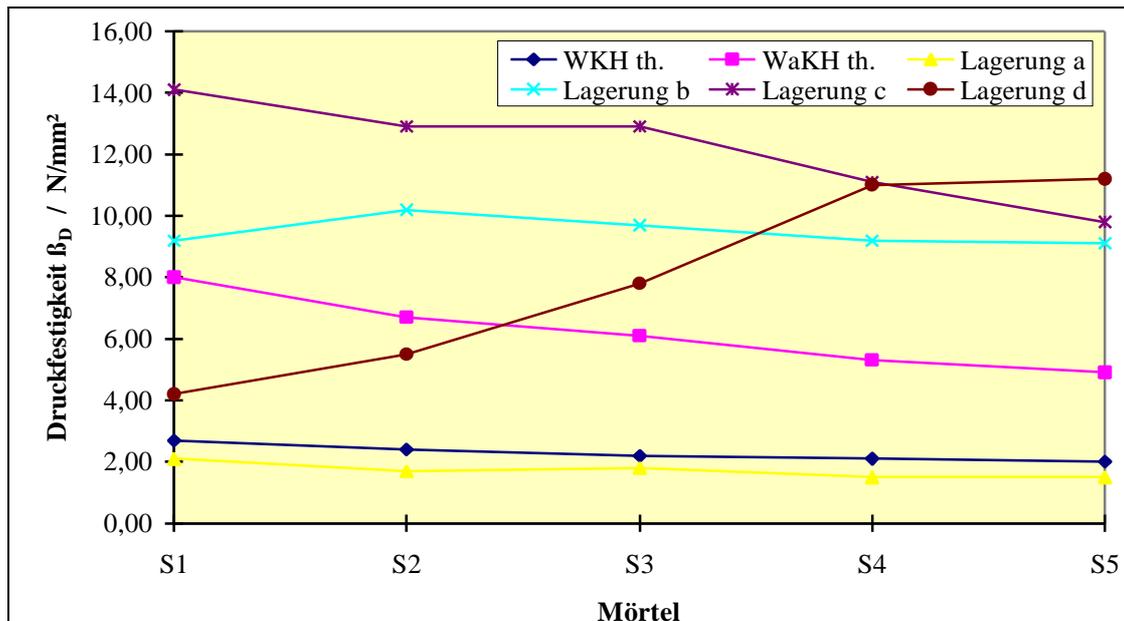


Bild 43: Vergleich der nach SCHÄFER 1993a berechneten (WKH th., WaKH th.) mit den tatsächlich bestimmten Festigkeiten der untersuchten Sandkalkmörtel S1-S5 nach unterschiedlichen Lagerungsarten

Die Kalkputze erreichen bei den Lagerungen b, c und d stets höhere Festigkeiten als die berechneten Werte. Die Korrelation der berechneten Werte mit den Druckfestigkeiten der Mörtel nach Lagerung a (28 Tage) ist dagegen gut.

Die Ergebnisse zeigen, daß auch unter Praxisbedingungen (Lagerung in der Einhardbasilika) so hohe Festigkeiten wie bei den gewählten Laborbedingungen erzielt werden. Die Laborergebnisse sind daher übertragbar.

Hydraulische Anteile sind nach der Röntgenfluoreszenzanalyse der Bindemittel und Bestimmung des HCl-löslichen SiO₂-Anteils in den erhärteten Mörteln auszuschließen. Sie entfallen deshalb bei der Diskussion der Festigkeitsentwicklung.

Die starke Festigkeitsveränderung der Kalkputze in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer muß bei der Entwicklung von Ersatzmörteln berücksichtigt werden. Auch sollte

¹¹⁹ CL90/2 löscht unter Bildung sehr harter Kalkspatzen ab und führte nach diesen Versuchen zu besonders hohen Festigkeiten, die sich bei anders ablöschenden Branntstückkalken (CL90/1, CL90/3) nicht bildeten. Siehe hierzu auch die Erläuterungen in Kapitel 7.3.5, Seite 141.

das Löschverhalten geprüft werden, um die Bildung zu harter Kalkspatzen und infolge die Bildung zu hoher Festigkeiten zu vermeiden.

Mörtel auf Basis CL90/3 und WKH, die exakt dem historischen Vorbild nachgestellt waren, erzielten vergleichbare Festigkeiten wie die historischen Vorlagen.

7.4.2.2 Hygrische Eigenschaften

Die Mörtel weisen die in Tabelle 14 genannten Abhängigkeiten der hygrischen Eigenschaften von den veränderten Parametern auf.

Tabelle 14: Einflüsse des Bindemittels (Sandkalk), hoher Bindemittelgehalte (B/Z 1:1,85), niedriger Ausbreitmaße (12,0 cm), des Zuschlages S-IST und des Fließmittelzusatzes bei dem Bindemittel WKH und der Carbonatisierung auf die hygrischen Eigenschaften

	Binde- mittel	B/Z	Ausbreit- maß	Fließ- mittel	Zu- schlag	Lage- rung b	Bereich aller Mörtel
ϵ_{sF} / mm/m	↓	↑	↓	↓	↓	-	-6,4--31,0
ϵ_{s1} / mm/m	↓	↓	↓	↓	↓	-	-0,01--0,22
ϵ_q / mm/m	↓	↓	↓	↑	↓	-	0,07-0,13
ϵ_{s2} / mm/m	↓	↓	↓	↑	±	-	-0,06--0,11
ω / kg/(m ² ·√h)	↓	↓↑	↓↑	↓↑	↓	↓	1,6-15,7
μ -Wert / -	↑	↓	↑	↑	↑	↑↓	9-23
w_{ak} / kg/(m ² ·h)	↓	↑↓	↓↑	↓↑	-	↑	0,061-0,248

↓ erniedrigt den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↑ erhöht den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↓↑ keine klaren Tendenzen erkennbar

- nicht bestimmt

Hygrische Dehnung

Die Mörtel weisen ein deutlich geringeres **1. Schwinden, Quellen** und **2. Schwinden** (Tabelle A45 im Anhang) als die Haft- und Hinterfüllmörtel auf.

Das 1. Schwinden ist bei Sandkalkmörteln (nicht CL90/2) < Kalkmörteln und nimmt mit dem Bindemittelgehalt (B/Z) und dem W/B-Wert ab.

Quellen und 2. Schwinden sind sehr gering und abhängig vom Bindemittel, B/Z-Verhältnis und W/B-Wert. Deutlich größere Dehnungen werden durch das Fließmittel verursacht. Der Zuschlag L-IST erhöht die hygrischen Dehnungen geringfügig u. a. deshalb weil er geringe Mengen Kaolin enthält.

Wasseraufnahme und Wasserabgabe

Bei der Bestimmung der Wasseraufnahme und Wasserabgabe sind die in den Tabellen A47 bis A50 im Anhang befindlichen Ergebnisse angefallen, siehe auch die Bilder 44 bis 46.

Die Wasseraufnahme und Wasserabgabe der Kalkputze werden besonders deutlich vom verwendeten Bindemittel (Sandkalk, WKH, WKH + F10) und von der Lage-

rungsart beeinflusst. Im einzelnen wirken sich die verschiedenen Parameter wie folgt aus.

Sandkalkmörtel bzw. Kalkmörtel mit Fließmittelzusatz weisen gegenüber den Kalkmörteln geringere Wasseraufnahmekoeffizienten (w), Wasseraufnahmegrade (w_m), Wasserabgabekoeffizienten (w_{ak})/Verdunstungsmassenstromdichten (\dot{m}_{knick}), Wasserabgabegrade (w_{ab}) und höhere μ -Werte auf.

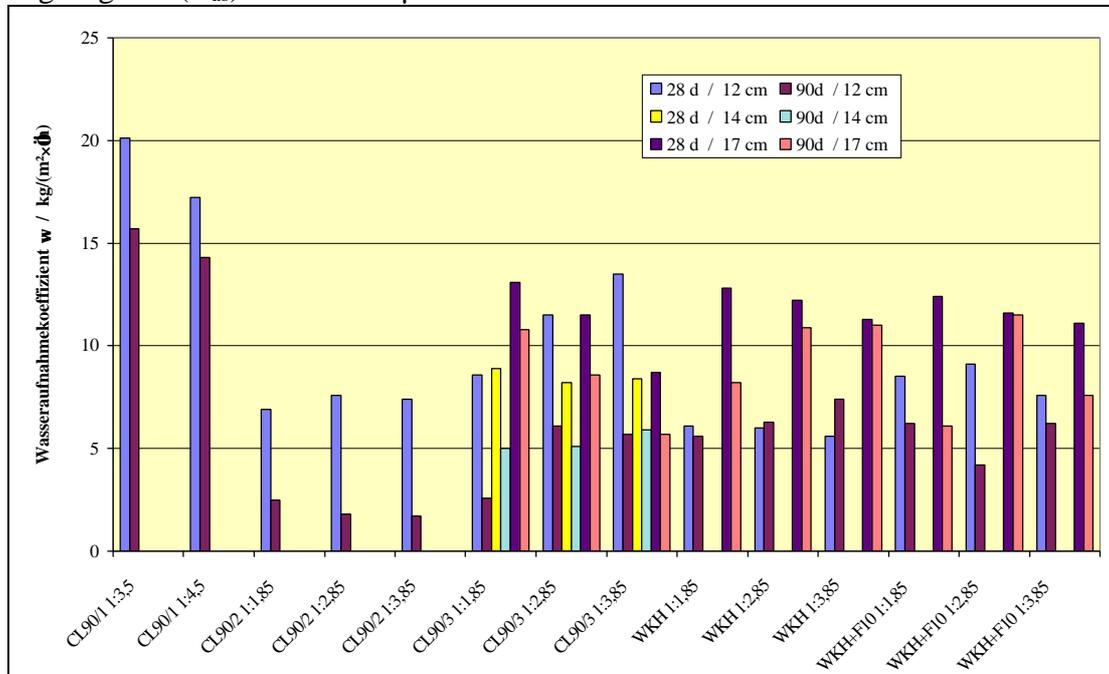


Bild 44: Wasseraufnahmekoeffizienten der Kalkputze in Abhängigkeit vom Bindemittel, dem B/Z-Verhältnis, dem Ausbreitmaß, der Lagerungsart und dem Einsatz von Fließmittel

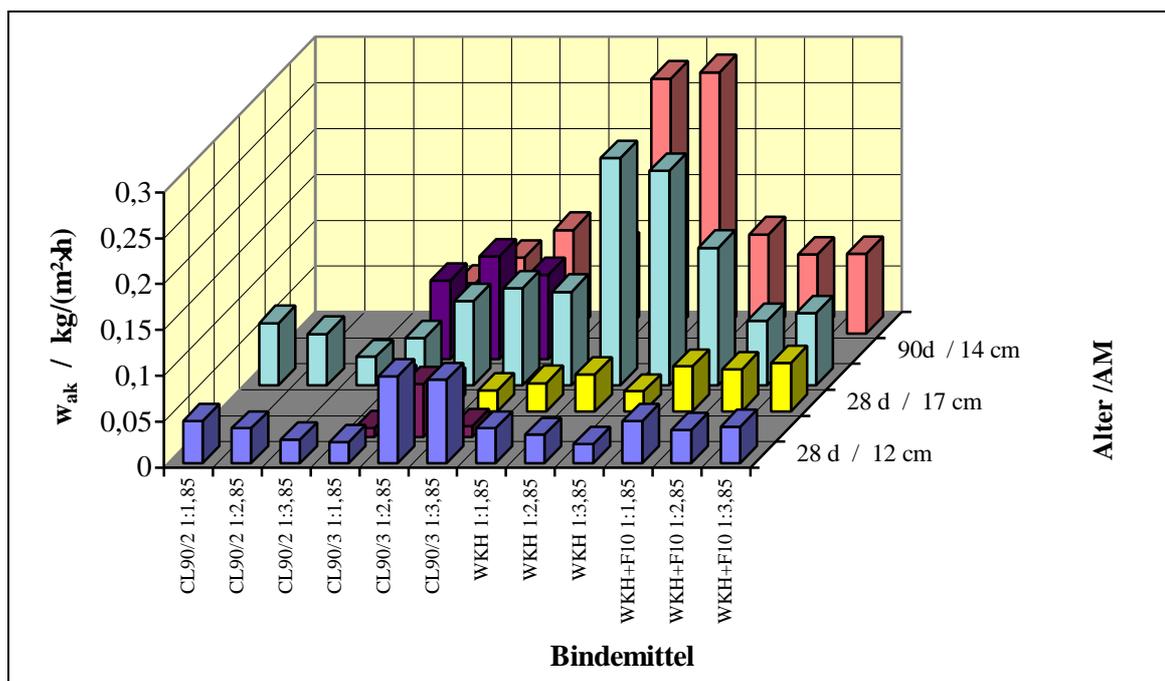


Bild 45: Wasserabgabekoeffizienten der Kalkputze in Abhängigkeit vom Bindemittel, dem B/Z-Verhältnis, dem Ausbreitmaß, der Lagerungsart und dem Einsatz von Fließmittel

Die Veränderung der B/Z-Verhältnisse in Richtung höherer Bindemittelgehalte bewirkt in der Regel eine Erhöhung der w_{ak}/\dot{m}_{knick} und niedrigere μ -Werte, die ω -Werte lassen keine klare Tendenz erkennen.

Niedrige Ausbreitmaße und damit niedrige W/B-Werte senken die ω -Werte und erhöhen die μ -Werte. Der Einfluß läßt auf w_{ak}/\dot{m}_{knick} keine klare Tendenz erkennen.

Bei der Lagerung verändern sich die Mörtel Eigenschaften z. T. gegenläufig. Die Lagerungsarten b und c mit Wasserzwischenlagerung führen zu verstärkter Carbonatisierung begleitet von Umkristallisationen. Dabei entwickelt sich ein Gefüge, das die Wasseraufnahmekoeffizienten, den Wasseraufnahmegrad senkt und die μ -Werte erhöht. Gleichzeitig verbessert sich das Trocknungsverhalten (Wasserabgabekoeffizient (w_{ak}) und Verdunstungsmassenstromdichte (\dot{m}_{knick})) z. T. um mehr als das 10fache, siehe Tabelle A49 und A50 im Anhang.

Die Wasserabgabegrade nach 24 Stunden sowie die Verhältnisse der im ersten Trocknungsabschnitt austrocknenden Wassermenge zum Wassergehalt bei Versuchsbeginn (w_{kn}) sind niedriger als bei den historischen Proben. Die Ursache hierfür ist in den unterschiedlichen Probekörperabmessungen zu suchen. Bezogen auf das Volumen weisen die Bohrkerne der historischen Proben (\varnothing 30 mm) gegenüber den Normprismen eine ca. 3fach größere Verdunstungsfläche auf.

Die Sandkalkmörtel zeigen geringere Wasseraufnahme- und Wasserabgabekoeffizienten/Verdunstungsmassenstromdichten als die historischen Mörtel. Die Wasserabgabegrade reduzieren sich mit der Lagerung b und c parallel zu den Wasseraufnahmegraden/flächenbezogenen Wassermengen, während sich die Wasserabgabe nach 24 Stunden, der w_{kn} und der w_{ak}/\dot{m}_{knick} erhöhen.

Die untersuchten Kalkputze sind wasserdampfdurchlässiger als die historischen Mörtel. Mit zunehmender Lagerungsdauer wird diese Differenz kleiner. Die ermittelten μ -Werte haben eine Größenordnung, die VAN BAALEN 1991 und BOENKENDORF 1995 auch für von ihnen untersuchte Mörtel feststellten.

Die hygrischen Eigenschaften der Sandkalkmörtel sind, bis auf die Wasserabgabe, den historischen Putzen der Torhalle Lorsch sehr ähnlich. Aufgenommenes Wasser wird langsamer wieder abgegeben als bei den Mörteln der Einhardbasilika in Steinbach. Jedoch ist festzustellen, daß die Geschwindigkeit der Wasserabgabe mit der Lagerungsdauer zunimmt. Die dauernden Feucht-Trockenwechsel erhöhen die Wasserabgabekoeffizienten deutlich. Dies führt dazu, daß die Kalkmörtel ohne Fließmittel nach Lagerung b, im Gegensatz zu den Sandkalkmörteln, Wasserabgabekoeffizienten aufweisen, die im Bereich der historischen Mörtel liegen.

VAN BAALEN 1991 erzielte z. T. andere Ergebnisse. Bei der Sorptionsfeuchte beobachtet er eine Abnahme der durch Sorption aufgenommenen Wassermenge und beim Wasseraufnahmekoeffizienten einen Anstieg des Koeffizienten mit zunehmendem

Probenalter. Eine Deutung dieser unterschiedlichen Ergebnisse ist zur Zeit nicht möglich.

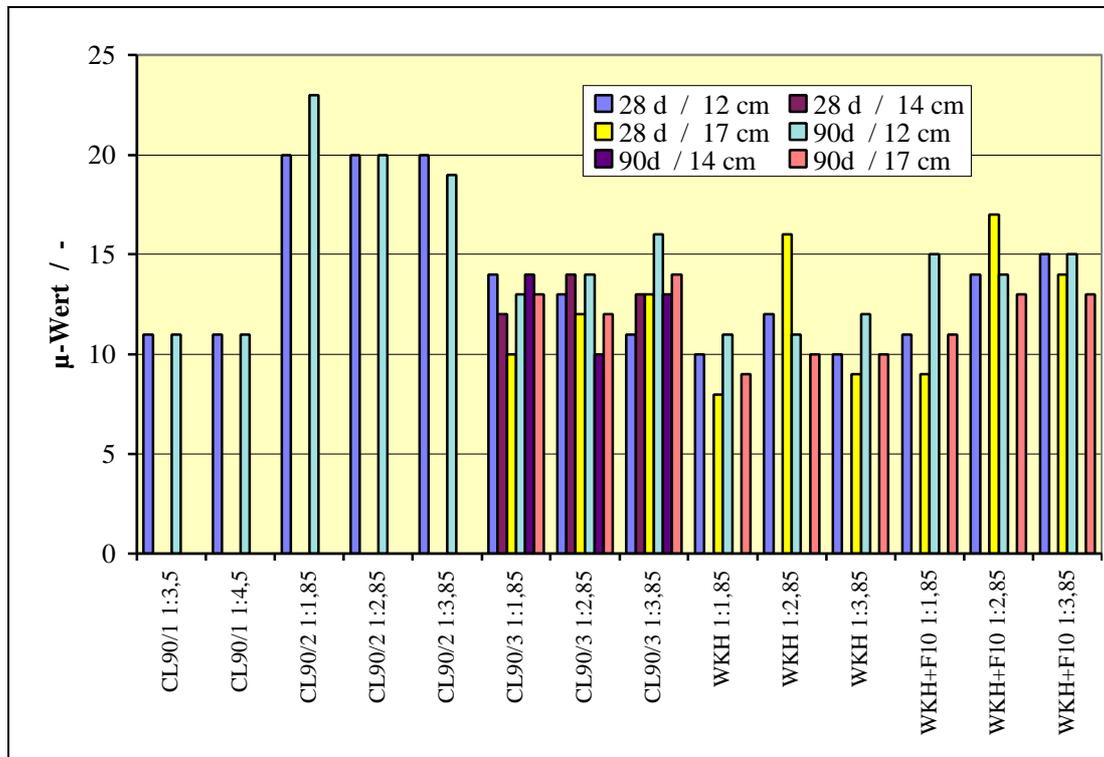


Bild 46: μ -Werte der Kalkputze in Abhängigkeit vom Bindemittel, dem B/Z-Verhältnis, dem Ausbreitmaß, der Lagerungsart und dem Einsatz von Fließmittel

Sandkalk- und Kalkmörtel (WKH) unterliegen nach diesen Untersuchungen großen Veränderung der Eigenschaften mit zunehmendem Alter. Es muß davon ausgegangen werden, daß die Entwicklung erst nach Jahren beendet ist.

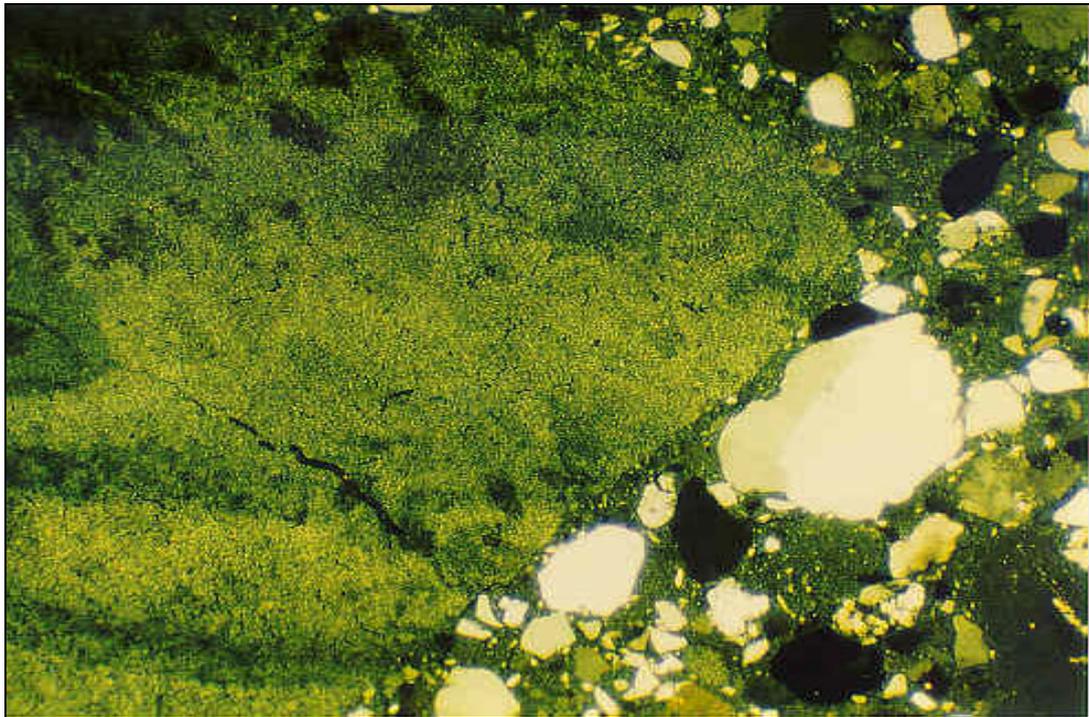
Eine gezielte Anpassung der Eigenschaften junger Mörtel an die Altsubstanz erfordert nach diesen Untersuchungen die Verwendung von porenbildenden Zusätzen, um eine Verbesserung der hygrischen Eigenschaften zu erzielen. Untersuchungen hierzu machte BOENKENDORF 1995.

Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten an, daß die Veränderung der Eigenschaften der Ersatzmörtel über einen langen Zeitraum möglichst praxisnah verfolgt werden muß, um sicherzugehen, daß keine Veränderungen eintreten, die zur Schädigung der historischen Substanz führen können.

7.4.2.3 Mikroskopische Untersuchungen

Exemplarisch wurden Proben mittels REM und Durchlichtmikroskopie untersucht. Die durchlichtmikroskopischen Untersuchungen ergaben, daß die Sandkalkmörtel und die Kalkmörtel mit Fließmittel ein sehr dichtes Gefüge aufwiesen und nicht vollständig carbonatisiert waren, siehe Bild 47 (nicht carbonatisiert) und Bild 48 (carbonatisiert). Die Prüfung der Carbonatisierungstiefe mit Phenolphthalein zeigte jedoch eine vollständige Carbonatisierung an. Nur vereinzelt färbten sich Kalkspatzen insbesondere des Bindemittels CL90/2 (Sandkalkmörtel S) rot.

Mittels REM bestätigten sich die durchlichtmikroskopischen Untersuchungen, wonach mindestens die Kalkspatzen noch nicht völlig carbonatisiert waren, siehe Bild 49. Das Gefüge der Mörtel verändert sich durch die Lagerung, jedoch nicht einheitlich. Partienweise sind zum einen Umkristallisationen, bedingt durch die Lagerungsbedingungen und eine dadurch verursachte Vergrößerung des Gefüges, feststellbar (Bilder 50 und 51), zum anderen existieren Gefügepartien, die so gut wie keine Veränderungen des Gefüges erkennen lassen. Die Kalkspatzen sind auch im REM gut erkennbar, da sie nicht völlig carbonatisiert sind; Portlandit und Calcit kommen nebeneinander vor.



— 170 μm

Bild 47: Lichtmikroskopische Aufnahme des nicht carbonatisierten Bereiches des Sandkalkmörteln B1 nach Lagerung b. Charakteristisch ist die blaugraue Färbung des Bindemittels. Risse innerhalb der Kalkspatzen sind nicht verheilt. Durchlicht, XPL.

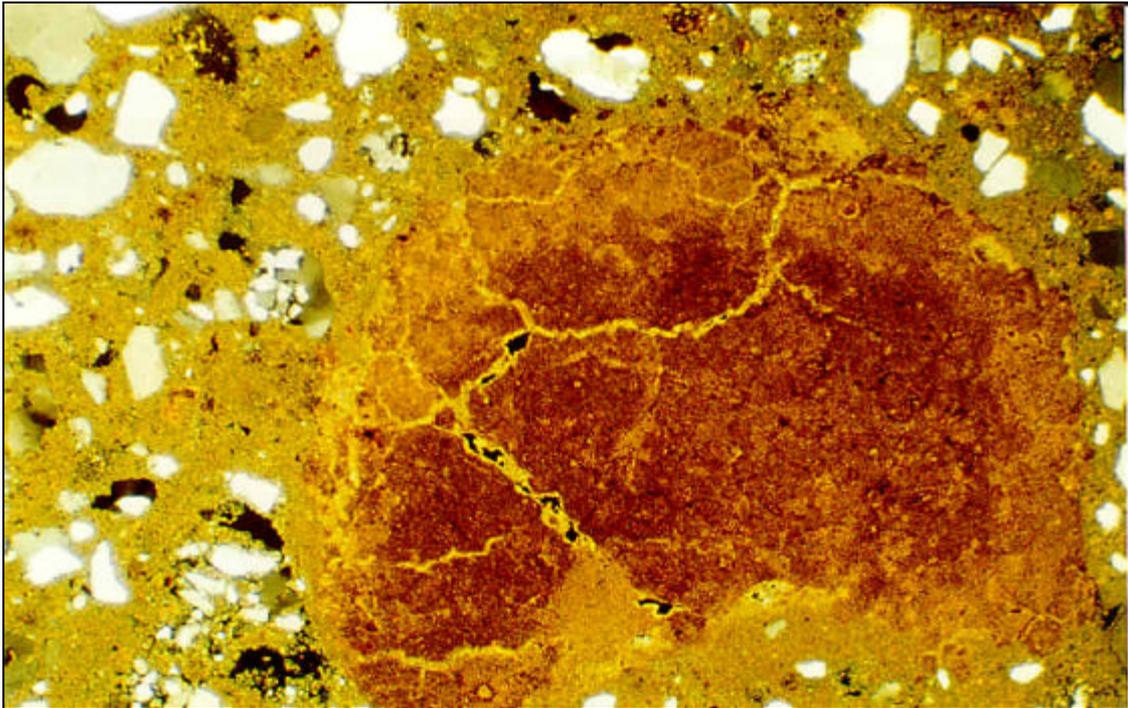


Bild 48: Lichtmikroskopische Aufnahme des völlig durchcarbonatisierten Bereiches des Sandkalkmörteln B1 nach Lagerung b. Wie bei historischen Kalkmörteln sind die Risse innerhalb der Kalkspatzen mit Calcit verheilt. Durchlicht, XPL.

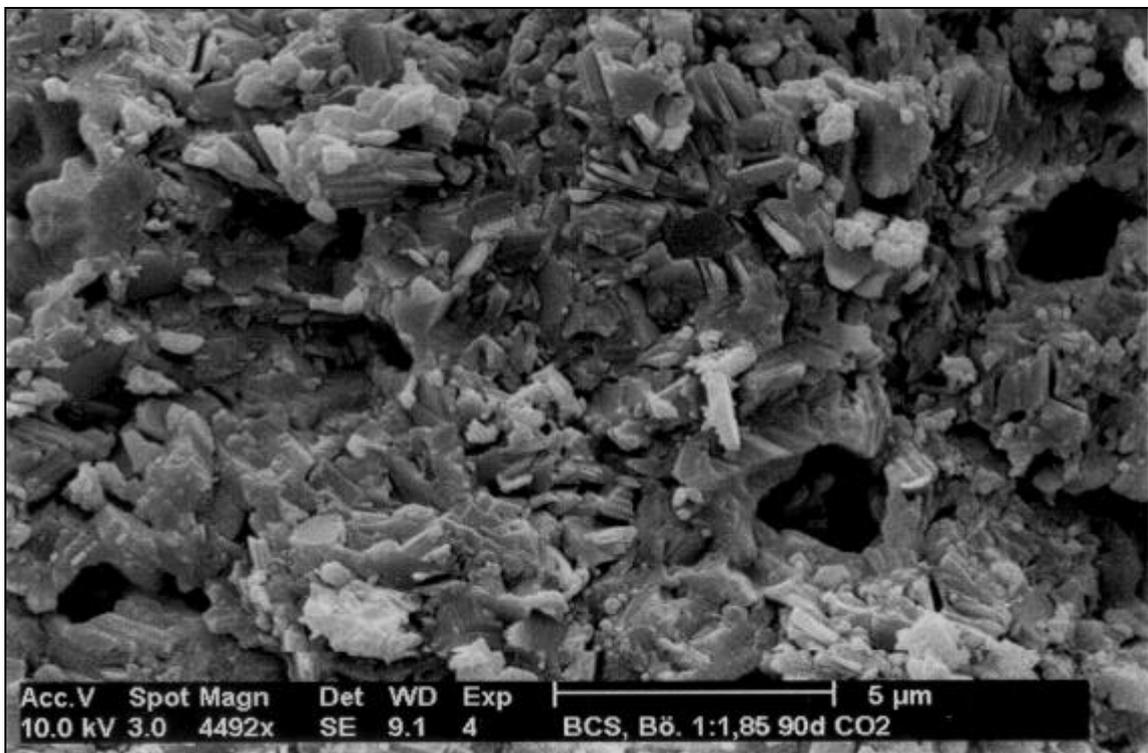


Bild 49: Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme eines nicht carbonatisierten Kalkspatzen des Mörtels S 1 nach Lagerung b

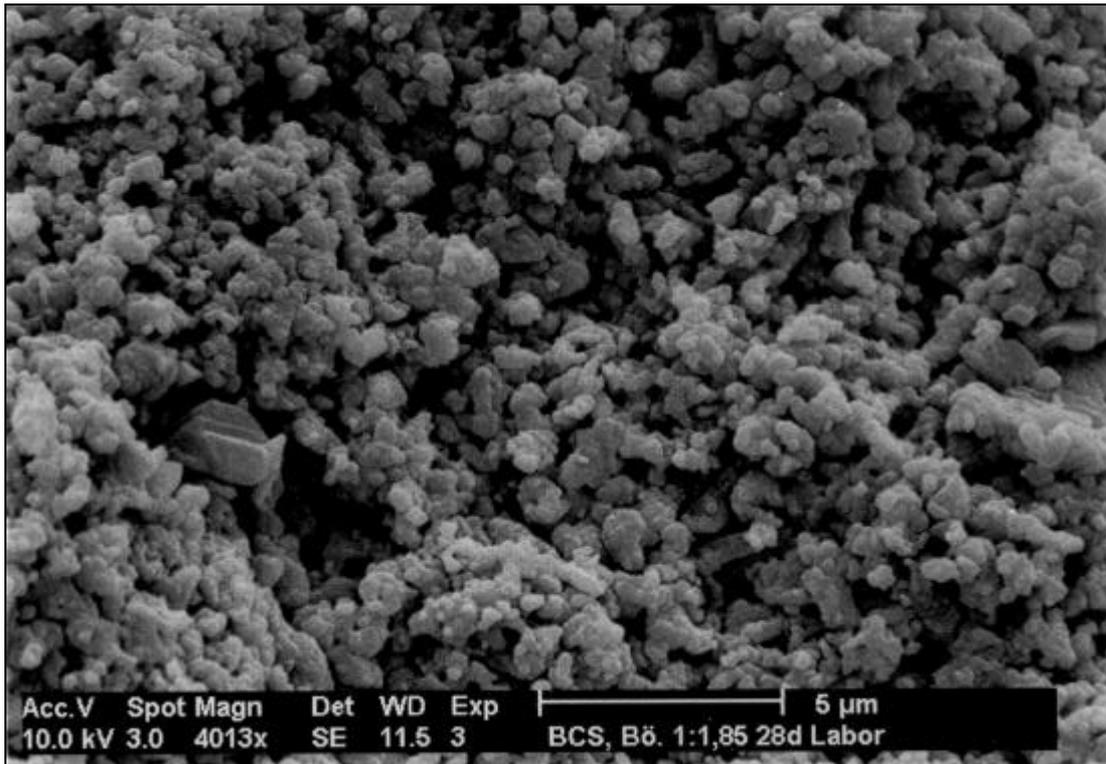


Bild 50: Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme des Mörtels S 1 nach Lagerung a. Das Bild zeigt die carbonatisierte Matrix (Bindemittel) nach 28tägiger Lagerung.

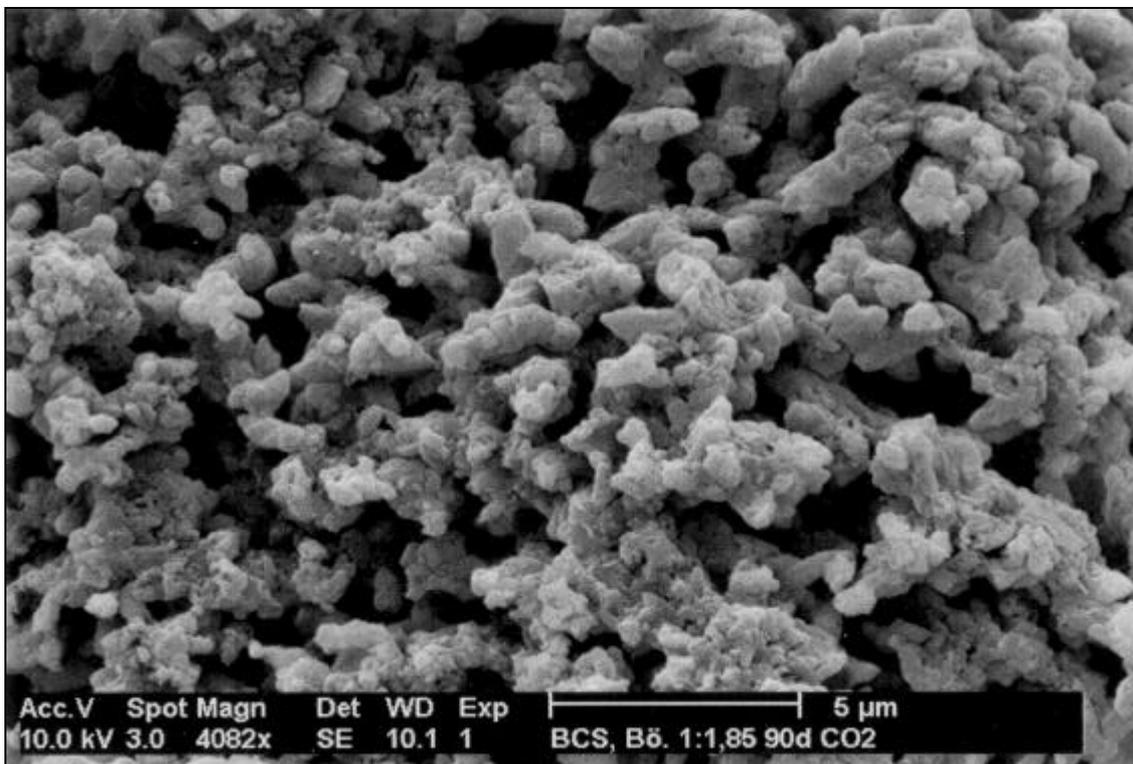


Bild 51: Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme des Mörtels S 1, nach Lagerung b. Die Gefügeveränderung durch die Lagerung wird erkennbar,

sie führt zu einer Vergrößerung des Gefüges. Zudem wird deutlich, daß die Calcitpartikel durch Umkristallisation zusammenwachsen.

7.4.2.4 Ausblühverhalten

Die untersuchten Kalkputze zeigten keine Ausblühungen bei Durchführung des genannten Prüfverfahrens. Hiervon war aufgrund der Zusammensetzung (Tabelle A14 in Anhang) auszugehen.

7.4.2.5 Thermische Dehnung

Die thermische Dehnung der verschiedenen Kalkputze wurde exemplarisch an den Mörteln der Serien L und S gemessen. Sie schwankte in geringen Grenzen und lag für den Temperaturbereich von -20 bis +20°C bei $9,5 \cdot 10^{-6}/K$ und von +20 bis +60°C bei $10,5 \cdot 10^{-6}/K$. Die Ergebnisse sind der Tabelle A48 im Anhang zu entnehmen.

7.4.2.6 Frost-Tauwechsel-Widerstand

Die Kalkputze wurden nur nach Lagerung c untersucht. Sie weisen hier einen unterschiedlichen Frost-Tauwechsel-Widerstand (FTW) auf.

Alle Kalkmörtel ohne Fließmittel sind nicht FTW-widerstandsfähig, die Prismen zeigen Risse und Absplitterungen. Die Kalkmörtel mit Fließmittel weisen z. T. Ribbildung (B/Z 1:1,85 und 1:2,85 mit hohem Ausbreitmaß), aber keine Absplitterungen auf. Der höchste FTW-Widerstand ist bei den Sandkalkmörteln festzustellen, hier sind lediglich bei den Mörteln mit dem höchsten Bindemittelgehalt (1:1,85) deutliche Absplitterungen festzustellen. Ganz geringfügige Absplitterungen sind zudem nach Abschluß der Untersuchung bei den Sandkalkmörteln mit dem Ausbreitmaß 12 cm erkennbar. Die Ergebnisse fallen günstiger als bei WINNEFELD 1996 aus. Ursache für das unterschiedliche Verhalten ist die Verwendung von anderen Zuschlägen, die einen geringeren Wasseranspruch bedingen.

7.4.2.7 Sorptionsverhalten

Das Sorptionsverhalten der Kalkputze ist den Tabellen A47, A48 und A51 bis A54 im Anhang sowie Tabelle 15 zu entnehmen.

Die Kalkputze weisen erwartungsgemäß geringe Sorptionsfeuchten und -dehnungen auf. Klare Abhängigkeiten werden lediglich bei Lagerung b erkennbar, sie führt zu höheren Sorptionsfeuchten und größeren Sorptionsdehnungen. Andere Tendenzen sind in Tabelle 15 zusammengefaßt. Die Umstellung der Lagerung - ab einer rel. Luftfeuchte von 30 % wurden die Prüfungen des Sorptionsverhaltens statt im Exsikkator im Klimaschrank durchgeführt - führte zu einer zusätzlichen Massezunahme und

zum Schwinden der zu Beginn der Messung 28 Tage alten Prüfkörper. Ursache für dieses Verhalten war die Carbonatisierung der Proben.

7.4.2.8 Innere Oberfläche nach BET

Die Ermittlung der inneren Oberfläche O_i über Wasserdampf nach der BET-Theorie ergab bei den Sandkalkmörteln S1-S5 eine Zunahme der O_i mit der Lagerung b. Alle anderen Veränderungen der Mörtelzusammensetzung beeinflussen die O_i , ohne jedoch klare Abhängigkeiten aufzuzeigen. Tabelle 15 faßt die erkennbaren Tendenzen der Einflußnahme zusammen. Wie schon in Kapitel 7.4.2.7 beschrieben, verursachte die Umstellung der Lagerung während der Ermittlung des Sorptionsverhalten und der inneren Oberfläche Probleme. Die O_i der zu Beginn der Messung 28 Tage alten Proben (Lagerung a) sind wegen der erfolgten Carbonatisierung nicht verwendbar, nur die nach dem herkömmlichen Verfahren ermittelten Werte der Proben L und S sind stimmig.

Tabelle 15: Einflüsse des Bindemittels (Sandkalk), hoher Bindemittelgehalte (B/Z 1:1,85), niedriger Ausbreitmaße (12,0 cm), des Zuschlages S-IST und des Fließmittelzusatzes bei dem Bindemittel WKH und der Carbonatisierung auf die Sorptionsfeuchte bei 53 % rel. Luftfeuchte, die innere Oberfläche (O_i) und die Sorptionsdehnungen (ϵ_{Sorpt}) nach Lagerung b

	Binde- mittel	B/Z	Ausbreit- maß	Fließ- mittel	Zu- schlag	Lage- rung b	Bereich aller Mörtel
u_{m53} / M.-%	↓↑	↓↑	↑↓	↓↑	↑	↑	0,05-0,43
O_i / m ² /g	↓	↓↑	↑↓	↓↑	↑	↑	0,9-7,8
ϵ_{Sorpt} / mm/m	↑	↑↓	↓↑	↑	-	↑	0,05-0,15

↓ erniedrigt den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↑ erhöht den Kennwert, Unterstreichung betont den dominierenden Einfluß

↓↑ keine klaren Tendenzen

- nicht bestimmt

7.4.2.9 Bestimmung des Kalkspatzen-Anteils

Stereomikroskopisch ließ sich mit Vergleichsschaubildern der Kalkspatzen-Gehalt der Sandkalkmörtel abschätzen. Der Kalkspatzen-Anteil der Mörtel lag im Mittel bei 3-5 M.-%, wie auch bei den historischen Mörteln.

7.4.2.10 Hg-Druckporosimetrie

Die Ergebnisse der Hg-Druckporosimetrie wie Rohdichte, Reindichte, Porenradienverteilung und mittlerer Porenradius sind in Tabelle A55 im Anhang dargestellt.

Die Carbonatisierung und Wasserzwischenlagerung der Lagerung b und die dadurch verursachten Umkristallisationen führen zu einer Senkung der Gesamtporosität um ca. 1,5 Vol.-%. Sie verursachen einerseits eine Vergrößerung des Porengefüges, siehe Bild 52, der mittlere Porenradius erhöht sich von 0,26 μm (Lagerung a) auf 0,37 μm

(Lagerung b), andererseits aber auch eine Erhöhung des Anteils feinsten Poren ($< 0,01 \mu\text{m}$) um ca. 0,3 Vol.-%.

Die Verschiebung des Porenmaximums in Richtung größerer Poren kann eine Erklärung für die erhebliche Erhöhung des Wasserabgabekoeffizienten sein. Jedoch werden gleichzeitig die Wasseraufnahmekoeffizienten erniedrigt und die μ -Werte erhöht. Eine Deutung dieser gegenläufigen Tendenzen ist nicht möglich.

Der erhöhte Anteil feinsten Poren, bedingt durch die Lagerung b, korreliert mit einer Erhöhung der inneren Oberfläche, die über Wasserdampf nach BET ermittelt wurde.

Die historischen Mörtel weisen meist höhere Gesamtporositäten auf. Nur Kalkmörtel mit dem Bindemittel CL90/H erzielen Gesamtporositäten, die im Bereich der historischen Mörtel liegen. Das Porenmaximum der untersuchten Mörtel liegt im Bereich von 1-0,1 μm . Deutliche Gehalte um 7-13 Vol.-% im Porenbereich von 10-1 μm sind lediglich bei historischen Putzen nachweisbar (siehe Tabelle A11 im Anhang). Dieser Porenanteil wird von den untersuchten Kalkputzen nur teilweise erreicht (1-7 Vol.-%). Die Veränderung des Wassergehaltes der Mörtel führt nicht zur Verschiebung der Porenverteilung in Richtung Porenvergrößerung, lediglich der Gesamtporengehalt nimmt tendenziell zu.

BOENKENDORF 1995 hat bei seinen Versuchen Poren im Bereich von 10-1 μm durch Zusatz von Proteinen (Blutplasma) bei Kalkmörteln auf Basis WaKH erzeugt. Andere Proteine wie Casein, Molkeeiweiß oder Kollagen führen zwar zum Eintrag von Poren mit dem Porenradius $> 50 \mu\text{m}$, nicht aber im Bereich 10-1 μm .

Die veränderten Parameter reichen nicht aus, um eine mit den untersuchten historischen Kalkmörteln vergleichbare Gefügestruktur zu erzeugen.

Die Hg-Druckporosimetrie ergab für die Sandkalkmörtel und die Kalkmörtel mit dem Sand Steinbach etwas geringere Gesamtporositäten als bei den historischen Putzmörteln und z. B. von VAN BAALEN 1991.

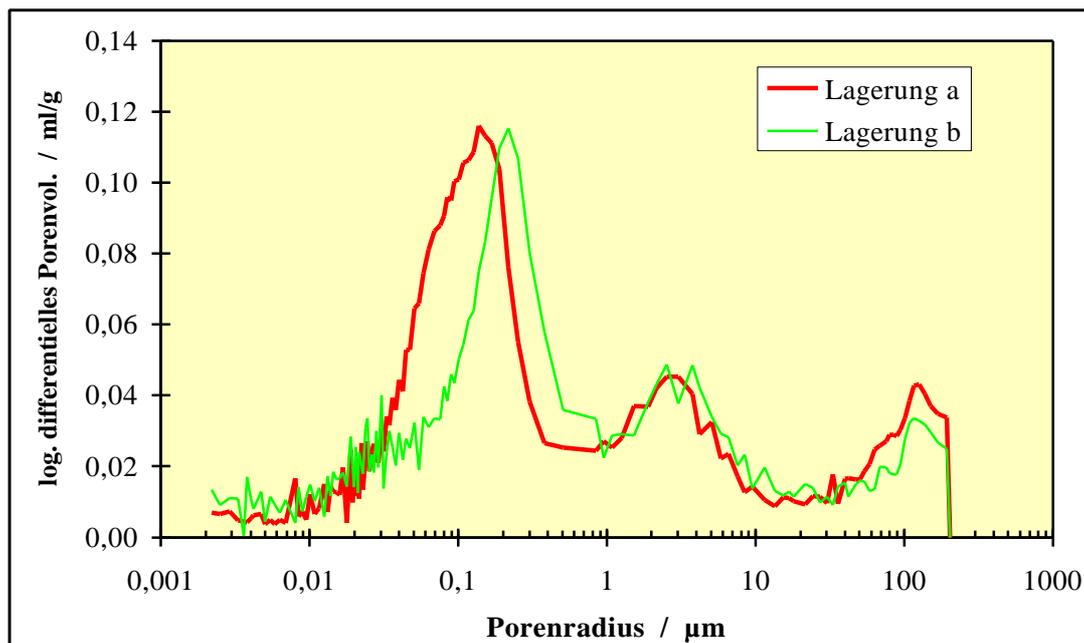


Bild 52: Veränderung der Porenradienverteilung (PRV) durch die Lagerung dargestellt am Sandkalkmörtel S 1,85 mit einem B/Z von 1 : 1,85 nach Lagerung a und Lagerung b.

7.4.2.11 Applikation der Kalkputze an Musterflächen

Die Sandkalkmörtel L1 und L2 wurden in der Torhalle in Lorsch und die Mörtel S1-S6 in der Einhardbasilika in Steinbach an Musterflächen appliziert.

Alle Mörtel wurden nach einem Jahr beprobt und die Haftzugfestigkeiten bestimmt, zudem konnte an den Mörteln S1-S6 die Druckfestigkeiten ermittelt werden. Hierüber wurde in Kapitel 7.4.2.1 berichtet.

Alle Sandkalkmörtel wurden mit einem Ausbreitmaß zwischen 11 und 12 cm verarbeitet, um das Schwinden zu minimieren. Die Mörtel wiesen trotz des starken Schwindens im Labor keine Risse auf und hafteten gut am Putzgrund.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse und des positiven Verhaltens der Musterflächen wurde Torhalle in Lorsch im Jahre 1991 mit dem Sandkalkmörtel L2 restauriert. Seit dieser Zeit weisen die restaurierten Flächen keine Risse auf. Schäden im Verbund mit den historischen Mörteln sind nicht aufgetreten.

7.5 Zusammenfassung zu Kapitel 7

Verschiedene Kalkputze wurden umfassend hinsichtlich ihrer mechanischen, mineralogischen und hygrischen Eigenschaften sowie ihrer Porenstruktur untersucht. Dabei wurden Sandkalkmörtel nach dem von KRAUS 1989 genannten Verfahren (Löschen des zerkleinerten Branntstückkalkes mit feuchtem Sand) und Kalkmörtel unter Verwendung von Weißkalkhydrat hergestellt. Der Einfluß gezielter Veränderungen bestimmter Parameter wie Bindemittel, Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis (B/Z), Wasser/Bindemittel-Wert (W/B), Zuschlag, Zusatz von Fließmittel und der Lagerungsart auf die Mörtel­eigenschaften wurde untersucht. Die Mörtel­eigenschaften der so variierten Mörtel wurden mit denen historischer Kalkputzen aus der Torhalle in Lorsch, der Einhardbasilika in Steinbach, dem ehemaligen Zisterzienserkloster Heydau und dem Magdeburger Dom verglichen.

Die Zusammensetzung der Sandkalkmörtel entsprach z. T. exakt dem Mittel der historischen Vorlagen aus der Torhalle in Lorsch bzw. der Einhardbasilika in Steinbach, aber auch geringere Bindemittelgehalte wurden eingesetzt. Die Lagerung erfolgte in Anlehnung an DIN 18555, Teil 3 28 Tage im Normklima DIN 50014-23/50-2 (Lagerung a) und in mit 1 Vol.-% CO₂ angereicherter Atmosphäre bei 65 % rel. Luftfeuchte mit zweimaliger wöchentlicher Wasserzwischenlagerung von 30 s (Lagerung b, 90 d) bzw. 30 min (Lagerung c, 180 d). Einige mechanische Eigenschaften wurden ein Jahr nach der Applikation vor Ort (Lagerung d) geprüft.

Die Untersuchungen zeigen, daß alle aufgeführten Veränderungen der Mörtelzusammensetzung die Eigenschaften der Festmörtel erwartungsgemäß beeinflussen. Dabei wirken sich die Wahl des Bindemittels, der Lagerungsart, des Zuschlages und die Zu-

gabe von Fließmittel besonders deutlich auf die Mörtel­eigenschaften aus. Doch sind auch durch Veränderung der W/B-Werte und der B/Z-Verhältnisse Veränderungen der Eigenschaften der Mörtel zu beobachten.

Die veränderten Parameter verursachen die folgenden Veränderungen:

- Die Wahl des Bindemittels Sandkalk oder WKH mit Fließmittel verändert die Mörtel­eigenschaften am nachhaltigsten. Dies betrifft sowohl die Festigkeiten, die bei WKH mit Fließmittel deutlich höhere Werte im Vergleich zum Bindemittel WKH annehmen, als auch die hygrischen Eigenschaften, die bedingt durch das dichtere Gefüge dieser Mörtel undurchlässiger sind. Dabei wirkt sich das unterschiedliche Lös­verhalten der Sandkalke aus. Extreme Weichbranntkalke, ggf. auch leicht erhöhte Sulfat­gehalte, können zur Bildung sehr harter Kalkspatzen (oder Kalkgrieß) führen, die nicht mehr mit dem Fingernagel ritzbar sind. Üblicherweise sind Kalkspatzen relativ weich und sehr leicht mit dem Fingernagel ritzbar. Das geschilderte Lös­verhalten führt bei den untersuchten Sandkalkmörteln zu höheren Festigkeiten und μ -Werten sowie niedriger Wasserabgabe.
- Hohe Bindemittel­gehalte führen zu geringerem Wasseranspruch, zu höheren Festigkeiten und einem dichteren Gefüge, welches seinerseits die hygrischen Eigenschaften beeinflusst, die Mörtel weniger durchlässig macht.
- Unterschiedliche W/B-Werte (bedingt durch die verschiedenen Ausbreitmaße) beeinflussen die Mörtel­eigenschaften. Hohe W/B-Werte führen zu Festigkeitserniedrigungen und verändern die hygrischen Eigenschaften in Richtung größerer Durchlässigkeit.
- Der Zuschlag L-IST beansprucht im Gegensatz zum Zuschlag S-IST eine erhöhte Wasserzugabe. Dies wirkt sich negativ auf die Festigkeitsentwicklung aus und verändert die hygrischen Eigenschaften der Mörtel wie Wasseraufnahmekoeffizient, Austrocknungsverhalten und μ -Wert sehr stark in Richtung größerer Durchlässigkeit. Ursache hierfür kann der Kaolingehalt dieses Zuschlages sein.
- Unterschiedliche Lagerungen, die hier so konzipiert wurden, daß es zu Umkristallisationen innerhalb des Gefüges kommen konnte, führten zu einer erheblichen Steigerung der Festigkeit. Begleitet wird dies von einer Verringerung der Gesamtporosität und einer Verschiebung des mittleren Porendurchmessers zu höheren Werten hin. Die hygrischen Eigenschaften (Wasseraufnahme, Wasserabgabe und Wasserdampf-Diffusion) werden teilweise deutlich in Richtung geringerer Durchlässigkeit verändert, während sich die Trocknungsgeschwindigkeit stark erhöht. Diese gegenläufige Tendenz kann zur Zeit noch nicht begründet werden. Die hygrischen Eigenschaften verändern sich mit der Lagerung b und c in Richtung dichteres Gefüge, d. h., die Wasseraufnahmekoeffizienten und die Wasserdampf-Diffusion nehmen ab, gleichzeitig wird das Trocknungsverhalten der Mörtel verbessert. Dies ist bedingt durch die Wasserzwischenlagerung, wodurch Umkristallisationen verur-

sacht werden. Sie führt einerseits zu einer Verschiebung der Porenstruktur in Richtung größerer Porenradien, andererseits zu einer Zunahme der feinsten Poren. Alle Kalkputze weisen ein starkes Schrumpfen in der Form auf, das sich zwischen 6,5 und 31,0 mm/m bewegt. Dabei liegt die Schwankungsbreite für Sandkalkmörtel zwischen 6,5 und 18,5 mm/m und für Kalkmörtel (WKH) zwischen 15,0 und 31,0 mm/m. Diese starken Dehnungsänderungen sind problematisch - Flankenabrisse, Risse im Putz und Haftungsprobleme scheinen vorprogrammiert.

Die im Labor erzielten Festigkeiten konnten an vor Ort befindlichen Musterflächen bestätigt werden. Die dabei ermittelten, z. T. sehr hohen Festigkeiten (Druckfestigkeit: "CO₂-Lagerung" bis 14 N/mm² (Lagerung c), vor Ort bis 11 N/mm² (Lagerung d), Haftzugfestigkeit vor Ort: 0,15 N/mm²) übertreffen die nach Ansicht von SCHÄFER 1993a maximale theoretische Festigkeit für Mörtel auf Basis WKH.

Die Ergebnisse veranschaulichen, daß ein Kalkmörtel durch Umkristallisierungsprozesse infolge Feuchtigkeits- und CO₂-Zutritt einer steten Veränderung seiner Eigenschaften unterworfen ist, was bei der Konzeptionierung der Mörtel zu beachten ist. Dies wirkt sich in der Praxis z. B. durch die Verheilung von Rissen aus. Die hohen Festigkeiten beruhen auf der Umkristallisation des Bindemittels, bedingt durch die gewählten Lagerungsbedingungen der Mörtel. Die hohen Festigkeiten werden durch den Einsatz des Zuschlages S-IST unterstützt, der ein dichtes Gefüge ergibt. Sandkalkmörtel weisen durch diese Vorgänge besonders große Festigkeitszunahmen auf. Ein Grund hierfür ist die lange Dauer bis zur Carbonatisierung der Kalkspatzen. Sie waren bis zum Abschluß der Untersuchungen nicht völlig carbonatisiert. Dies bedeutet, daß lange Ca(OH)₂ gelöst werden kann und für Umkristallisationen zur Verfügung steht. Die Löslichkeit von Portlandit ist ca. 100fach höher als von Calcit.

In den Untersuchungen konnten Eigenschaftsveränderungen in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden, die tendenziell mit den Ergebnissen anderer Autoren übereinstimmen. Einige Eigenschaften entwickelten sich gegenläufig.

Die Eigenschaften der untersuchten Mörtel auf Basis Sandkalk bzw. WKH stimmen z. T. recht gut mit den historischen Vorbildern überein. Dabei ist festzustellen, daß die Kalkmörtel (Basis WKH) die gewünschten Eigenschaftskennwerte besser erreichen. Diese Mörtel zeigen jedoch ein besonders starkes Schrumpfen in der Form.

In künftigen Untersuchungen sollte geklärt werden welchen Einfluß Tonminerale, die gezielte Veränderungen des Zuschlages und die Zugabe von Luftporen bildenden Zusätzen auf Sandkalk und Kalkmörtel hat. Weiterhin sollten Kalkmörtel mit geringem Zusatz von Zement in die Untersuchungen einbezogen werden, um das anfängliche starke Schwinden in der Form zu verbessern. Zudem bedarf der Einfluß einer langfristigen Verweildauer vor Ort, abhängig von der Bewitterung und der Lage am Bauwerk der Klärung.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Mörtelsystem entwickelt und dessen technologische und hygrische Kennwerte untersucht, das zur Erhaltung historischer Putze dienen soll. Dieses Mörtelsystem besteht aus den Teilen Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze, deren Eigenschaften an die historischen Putze angepaßt sein sollen. Dies betrifft nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch das hygrische Verhalten (hygrische Dehnungen, Wasseraufnahme- und -abgabeverhalten). Wegen der Sulfatbelastung historischer Putze sollen die Mörtel zudem einen hohen Sulfatwiderstand aufweisen. Die verschiedenen Mörtel sollen die folgenden Aufgaben bei einer Restaurierung übernehmen:

- Haftmörtel sollen vor der Verfüllung hohlliegender Putzbereiche zu deren Randsicherung und zum Wiederbefestigen lockerer Putzschollen dienen und mechanisch wieder leicht entfernbar sein, ohne die Altsubstanz zu schädigen.
- Hinterfüllmörtel dienen zum Verfüllen hohlliegender Putzpartien, die im Anschluß an die Maßnahme wieder einen ausreichenden und dauerhaften Verbund mit dem Untergrund aufweisen sollen. Sie können drucklos mit Spritzen eingebracht werden und müssen ein gutes Penetrationsvermögen aufweisen, damit alle Hohlräume sicher gefüllt werden.
- Kalkputze entweder auf Basis von Sandkalk (mit feuchtem Sand trocken gelöschter Brannstückkalk) oder auf Basis handelsüblichen Weißkalkhydrates (WKH) sollen, möglichst exakt den historischen Vorbildern nachgestellt, als Ersatz für abgängigen historischen Putz eingesetzt werden.

Untersuchung historischer Mörtel

Zur Ermittlung der hygrischen und technologischen Kennwerte historische Kalkputze konnten Putze der Torhalle Lorsch (8. Jahrhundert), der Einhardbasilika in Steinbach (9. Jahrhundert), des Magdeburger Domes (13. Jahrhundert) und des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau (16. Jahrhundert) beprobt und untersucht werden.

Die historischen Mörtel wiesen recht unterschiedliche Zusammensetzungen auf. So konnten B/Z-Verhältnisse (bezogen auf $\text{Ca}(\text{OH})_2$ als Bindemittel) zwischen 1:0,9 und 1:4,4 bestimmt werden. Die Zuschläge wiesen meist eine Körnung von 0-1 mm auf. Überkorn trat bis zu einer Korngröße von 4 mm stets in einer Größenordnung von 1-10 M.-% auf.

Alle historischen Putze, die aus Innenräumen und von Außenfassaden stammten, wiesen hohe Sulfatgehalte, überwiegend als Gips, auf. Sie waren bei Innenputzen auf die Oberfläche beschränkt, bei Außenputzen traten sie in Tiefen bis zu 12 mm auf.

Die hygrischen Eigenschaften wie Wasseraufnahme-, Wasserabgabekoeffizient, Sorptionsfeuchten und μ -Werte konnten an historischen Mörteln der Torhalle in Lorsch und der Einhardbasilika geprüft werden. Die Untersuchungen ergaben, wie unten aufgeführt, eine große Bandbreite der Kennwerte:

Tabelle 16: Hygrische Kennwerte der historischen Kalkmörtel aus der Torhalle in Lorsch und der Einhardbasilika in Steinbach

	ω / kg/(m ² ·√h)	w_{ak} / kg/(m ² ·h)	u_{m53} / M.-%	μ -Wert / -
Lorsch karol.	3,2	0,15	2,5	32
Lorsch got.	n. b.	0,11	3,5	21
Lorsch Erg.	2,4	0,10	2,7	20
Einhardbasilika	12,5	0,47	1,7	14

Entwicklung und Untersuchung des Mörtelsystems

Haftmörtel

Die Zusammensetzung der Haftmörtel wies in den Vorversuchen ein B/Z-Verhältnis von 1:3, in den Hauptversuchen zur Senkung der Festigkeiten eines von 1:4 auf. Als Bindemittel kamen ein Gemisch aus Hüttensand, Gips und Portlandzement (HGZ), ein Hochofenzement (HOZ) und ein Tonerdezement (TZ) zum Einsatz. Als Zuschlag wurde ein Quarzmehl < 90 μ m verwendet. Zur Verbesserung der Frisch- und Festmörteleigenschaften wurden die Zugabemengen von Methylhydroxyethylcellulose MC (0; 0,1; 0,2 M.-%) und Kunststoffredispersionspulver Kd P (0; 1; 2 M.-%) variiert. In der Summe wurden 18 Mörtel untersucht.

Aufgrund der Ergebnisse kommen die Mörtel H6 und H18 für den geplanten Einsatz als Haftmörtel in Betracht. Sie weisen einen Zusatz von 0,1 M.-% MC und 1 M.-% Kd P bezogen auf den Trockenmörtel auf und erfüllen alle Eigenschaftskennwerte des Anforderungsprofils. Sie besitzen geringe Festigkeiten, niedrige E-Moduln und geeignete μ -Werte.

Bei Musterflächen an verschiedenen Bauwerken, u. a. des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau, dem Schweriner Schloß (Terrakotta) und dem Magdeburger Dom haben sich die Haftmörtel bewährt. Die gewünschte leichte Abnehmbarkeit konnte erreicht werden.

Hinterfüllmörtel

Die Hinterfüllmörtel mit den Bindemitteln HGZ, HOZ und hochfeiner HOZ (Mikro) wiesen ein B/Z-Verhältnis von 1:1 auf. Als Zuschlag kam wie bei den Haftmörteln Quarzmehl < 90 μ m zum Einsatz. Die Fließeigenschaften bzw. das Penetrationsver-

halten wurde durch gezielte Kombination verschiedener Zusatzmittel verbessert und der Wasserbedarf minimiert. Der Einfluß unterschiedlicher Zugabemengen von Kunststoffdispersion (0; 2 M.-%) und PUR (0; 4; 7,5; 10,0; 12,5 und 15,0 M.-%) auf die hygrischen und mechanischen Eigenschaften wurde untersucht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Anpassung der Hinterfüllmörtel an die Eigenschaften der historischen Kalkputze, insbesondere mit dem Bindemittel HGZ, gelungen ist. Dies betrifft die Festigkeiten (Druck- und Haftzugfestigkeit), die E-Moduln und die hygrischen Eigenschaften (Wasseraufnahme-, Wasserabgabekoeffizient und μ -Werte). Bei den Hinterfüllmörteln wird dies i. d. R. durch den Zusatz geringer Mengen PUR (4 M.-%) erreicht. Die Mischungen HGZ2, HGZ2 Kd, HOZ1 Kd und HOZ2 Kd eignen sich für den Einsatz als Hinterfüllmörtel. Sie erfüllen das Anforderungsprofil in allen Punkten.

Applikationen der Hinterfüllmörtel an mehreren historischen Bauwerken u. a. dem ehemaligen Zisterzienserkloster Heydau, dem Magdeburger Dom, dem Schweriner Schloß (Terrakotta) und der Fachwerkkirche in Eichelsachsen wiesen nach einjährigem Verbleib vor Ort einen einwandfreien Verbund sowohl mit dem Putz als auch dem Putzgrund auf, dies wird auch durch Untersuchungen der MPA Bremen bestätigt. Die ermittelten Haftzugfestigkeiten an den Bauwerken sind mit den Laborergebnissen vergleichbar. Der Verbund mit kritischen Putzen bzw. Putzuntergründen wie Lehm und Gips war nach rasterelektronen- und durchlichtmikroskopischen Untersuchungen einwandfrei. Die Bildung schädlicher Kristallneubildungen bei Kontakt mit Gips bzw. stark sulfatbelasteten Bereichen war nicht feststellbar. Nach nunmehr bis zu 5jähriger Verweildauer (ehemaliges Zisterzienserkloster Heydau) ist der Verbund immer noch einwandfrei.

Kalkputze

Bei der Entwicklung von Kalkputzen als Ersatz- bzw. Ergänzungsmörtel für die Restaurierung historischer Bauwerke wurden folgende Parameter verändert: das Bindemittel (Sandkalk und WKH), das B/Z-Verhältnis, der Zuschlag, das Ausbreitmaß und damit die W/B-Werte und die Lagerung bis zur Prüfung. Zudem wurde z. T. Fließmittel zugegeben.

Die Kalkputze lassen eine Einflußnahme aller veränderten Parameter auf die Mörtel Eigenschaften erkennen, jedoch werden sie besonders vom Bindemittel (Sandkalk oder WKH), der Lagerungsart, vom Fließmittelzusatz und dem verwendeten Zuschlag beeinflusst. Die untersuchten Mörtel weisen in vielen Bereichen vergleichbare Eigenschaften wie historische Kalkmörtel auf.

Viele Eigenschaften der Sandkalk- und Kalkmörtel entwickeln sich erst im Laufe der Lagerung. Lagerung b (90 d Lagerung in Luft mit 1 Vol.-% CO₂ und zweimaliger Wässerung pro Woche) führt zu erheblichen Festigkeitzuwächsen, die teilweise das 4-6fache der Festigkeit nach 28 Tagen Laborlagerung betragen. Dabei werden besonders große Festigkeitssteigerungen bei Sandkalkmörteln und bei Kalkmörteln mit Fließmittelzusatz erzielt. Durch die Lagerung b bedingt erhöhen sich die Wasserabgabekoeffizienten z. T. um das 10fache. Gegenteilig entwickeln sich die anderen hygrischen Eigenschaften geringfügig in Richtung geringerer Durchlässigkeit.

Der Applikation von Musterflächen an der Torhalle in Lorsch und der Einhardbasilika in Steinbach folgte eine Restaurierung der Torhalle in Lorsch. Die restaurierten Flächen sind rißfrei. Nach mehr als 6 Jahren ist ein einwandfreies Aussehen der Flächen zu verzeichnen. Schäden im Verbund mit den historischen Mörteln sind nicht aufgetreten.

9 Literaturverzeichnis

- ALESSANDRINI 1985 Alessandrini, G.: Plasters in historic buildings: Analytical methods for its physical and chemical classification. Preprints of the Meeting: L'intonaco: storia cultura e tecnologia. Atti del convegno die studi. Bressanone, 24. - 27.6.1985, S. 147 - 166
- ALEXEJEW 1976 Alexejew, S. N. ; Rosental, N. K.: Korrosion von Stahlbeton in aggressiver Industrieluft. Berlin, VEB Verlag für das Bauwesen, 1. Auflage, 1976
- ARNOLD 1981 Arnold, A.: Salzminerale in Mauerwerken. Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen, 61(1981), S. 147 - 166
- ARNOLD 1989 Arnold, A. ; Zehnder, K.: Salt weathering on monuments. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin ; The influence of coastal environment and salt spray on limestone and marble. Proceedings of the 1st International Symposium, Bari, 7 - 10 June 1989, scientific editor Fulvio Zezza, Grafo, 1989
- BALÁZS 1994 Balázs, G. und Deme-Csányi: Dauerhaftigkeit von Stahlbeton. (Einfluß von Luftschadstoffe: SO₂ und NO_x). 12. Internationale Baustofftagung - ibausil, 22. - 24.9.1994, Tagungsbericht Band 2, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar 1994
- BEILKE 1975 Beilke, S. ; Lamb, D. und Müller, J.: On the uncatalyzed oxidation of atmospheric SO₂ in aqueous systems. Atmospheric Environment, 9(1975), S. 1083 - 1090
- BELK 1996 Belk, G.: Persönliche Mitteilung über die Baugeschichte des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau
- BERTRAM 1956 Bertram, W.: Die Verwendung des Kalkes in der Denkmalpflege. Deutsche Kunst und Denkmalpflege, Heft 1, München, 1956, S. 52 - 56
- BICZOK 1968 Biczok, I.: Betonkorrosion Betonschutz. 2. Deutsche Auflage, Bauverlag, Wiesbaden - Berlin - und Akadémiai Kiadó, Budapest, 1968
- BIEHL 1927 Biehl, K.: Beiträge zur Kenntnis alter Römer-Mörtel. Tonindustrie-Zeitung, 51(1927), S. 439 - 444

- BIEHL 1930 Biehl, K.: Beiträge zur Kenntnis alter Mörtel. Tonindustrie-Zeitung, 54(1930), S. 839 - 841
- BOENKENDORF 1994 Boenkendorf, U. ; Degenkolb, M. ; Knöfel, D.: Einfluß von Proteinen auf technologische Eigenschaften von Kalkmörteln Tagungsberichte 12. Internat. Baustofftagung (ibausil), Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, September 1994, Band 3, S. 17 - 29
- BOENKENDORF 1995 Boenkendorf, U.: Putzmörtel auf Lehmausfachungen. Siegen, Universität-GH Siegen, Dissertation, 1995
- BOENKENDORF 1996 Boenkendorf, U. ; Degenkolb, M. ; Knöfel, D.: Proteine als Zusatzmittel in Kalkmörteln. In: Bauchemie heute: Fakten, Modelle, Anwendungen; Herausgeber, Böttger, K. G., Darmstadt, Dissertations-Druck Darmstadt, 1996, S. 77 - 88
- BONZEL 1973 Bonzel, J. ; Dahms, J.: Alkalireaktion im Beton: Beton, 23(1973), S. 495 - 500 und 547 - 554
- BONZEL 1986 Bonzel, J. Krell, J. ; Siebel, E.: Alkalireaktion im Beton: Beton, 36(1986), S. 345 - 348 und S. 385 - 389
- BÖTTGER 1991 Böttger, K. G. ; Knöfel, D. ; Gruber, H. ; Kober, H.: Entwicklung von polyurethanmodifizierten Estrichmörteln. In: Industriefußböden 91, Internationales Kolloquium, Technische Akademie Esslingen, Januar 1991, Herausgeber: P. Seidler, expert-Verlag, Ehningen, 1991, S. 355 - 370
- BÖTTGER 1993a Böttger, K. G. und Knöfel, D.: Entwicklung und Prüfung von Haftmörteln mit hohem Sulfatwiderstand. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Herausgeber: F. Wittmann, expert-Verlag, Ehningen, 1993, S. 1117 - 1127
auch veröffentlicht in:
Putzsicherung. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Heft 79, 1996, S: 15-20
- BÖTTGER 1993b Böttger, K. G. und Knöfel, D.: Development and testing of injection mortars of high sulfate resistance. Conservation of Stone and other materials, Proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress 1993, Vol. 2. Verlag: E. & FN Spon, London, S. 629 - 636

- BÖTTGER 1993c Böttger, K. G., Böttger, C. und Knöfel, D.: Die Mörtel der Torhalle in Lorsch - Untersuchung von historischen Mörteln und Entwicklung von Restauriermörteln, Kunst in Hessen und am Mittelrhein, Band 32+33(1992+1993): Kloster Lorsch, Hessisches Landesmuseum, Darmstadt, 1993, S. 105 - 114
auch veröffentlicht in:
Putzsicherung. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Heft 79, 1996, S: 21-20
- BÖTTGER 1993d Böttger, K. G. und Knöfel, D.: Entwicklung und Prüfung von Hinterfüllmörteln mit hohem Sulfatwiderstand. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, 3. Heft, 1993, Ausgabe B, S.107 - 110
- BÖTTGER 1994 Böttger, K. G. und Knöfel, D.: Eigenschaften von Kalkputzen für historische Bauwerke auf Basis trocken gelöschter Kalkmörtel (Sandkalkmörtel). Tagungsberichte 12. Internat. Baustofftagung (ibausil), Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, September 1994, Band 2, S. 17 - 30
- CANCRIN 1790 von Cancrin, F. L.: Abhandlung von der Natur, Untersuchung, Lagerstadt, Grabung und vortheilhaften Brennung auch dem bestmoeglichsten Gebrauch des Gyps- und Lederkalkes bei den Bauarbeiten. Krieger dem Jüngerem, Gießen, 1790
- CAMMERER 1960 Cammerer, J. S. ; Krischer, O. ; Kristen, Th. ; Wierig, H. J.: Wärme und Feuchtigkeit. Wärmeübergang, Wärmebedarf, Feuchtigkeit in Putzen und Wänden. Berichte des Beirates für Bauforschung beim Bundesminister für Wohnungsbau, Band 15, Verlag Ernst & Sohn, 1960
- CAMUFFO 1983 Camuffo, D. ; Del Monte, M. und Sabbioni, C.: Origin and growth mechanisms of the sulfated crusts on urban limestone. Water, Air and Soil Pollution, 19(1983), S. 351 - 359
- CANDELOT 1890 Candelot, E.: Rôle du chlorure de calcium et du sulfate de chaux sur la prise et le durcissement des mortiers. Tonindustrie-Zeitung 14(189), S. 867 - 890
- CHARTSCHENKO 1993 Chartschenko, I. ; Volke, K. ; Stark, J.: Untersuchungen über den Einfluß des pH-Wertes auf die Ettringitbildung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, 3. Heft, 1993, Ausgabe B, S.171 - 176

- CHARTSCHENKO 1995 Chartschenko, I. ; Stark, J.: Theoretische Grundlagen zur Anwendung von Quellzementen in der Baupraxis. Tagungsbericht des Internationalen Symposiums „75 Jahre Quellzement“, 11. 13.12.1995, Weimar, Hrsg.: J. Stark, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, 1995, S. 31 - 46
- CHENG 1987 Cheng, R. J. ; Hwu, J. R. ; Kim, J. T. und Leu, S. M.: Deterioration of marble structures. Analytical Chemistry 59(1987), S. 104 - 106
- CRAMMOND 1985 Crammond, N. J.: Thaumassite in failed cement mortars and renders from exposed brickwork. Cement and Concrete Research, 15(1985), S. 1139 – 1050
- DAfStB 1989 Richtlinie Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: „Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton“. September 1989
- D´ANS 1953 D´Ans, J. ; Eick, H.: Das System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ bei 20 °C. Zement-Kalk-Gips, 6(1953), S. 302 - 311
- DEL MONTE 1984 Del Monte, M. ; Sabbioni, C. und Vittori, O.: Urban stone sulphatisation and oil-fired carbonaceous particles. The Science of the Total Environment, 36(1984), S. 369 - 376
- DGfM 1992 Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e. V.: Vorläufige Richtlinie zur Ergänzung der Eignungsprüfung von Mauer-
mörtel; Druckfestigkeit in der Lagerfuge; Anforderungen Prüfung. Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e. V. (DGfM), Bonn
- DIN 1060alt Norm DIN 1060
Teil 1 Januar 1986 Baukalk; Begriffe, Anforderungen, Lieferung, Überwachung
Teil 2 November 1982 Baukalk; Chemische Analyseverfahren (gültig)
Teil 3 November 1982 Baukalk; Physikalische Prüfverfahren (gültig)
- DIN 1060 Norm DIN 1060
Teil 1 März 1995 Baukalk; Definition, Anforderungen, Überwachung
- DIN 1164 Norm DIN 1164 Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement
Teil 1 März 1990 Begriffe, Bestandteile, Anforderungen, Lieferung

-
- DIN 4226 Norm DIN 4226 Zuschlag für Beton
Teil 1 April 1983. Zuschlag für Beton; Zuschlag mit dichtem Gefüge, Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen
Teil 2 April 1983 Zuschlag für Beton; Zuschlag mit porigem Gefüge (Leichtzuschlag) Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen
Teil 3 April 1983 Zuschlag für Beton; Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge
Teil 4 April 1983 Zuschlag für Beton; Überwachung (Güteüberwachung)
- DIN 18550 Norm DIN 18550 Teil 1 Januar 1985 Putz - Begriffe und Anforderungen
- DIN 18555 Norm DIN 18555 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln
Teil 1 Allgemeines, Probenahme, Prüfmörtel
Teil 2 September 1982 Frischmörtel mit dichten Zuschlägen, Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts

Teil 3 September 1982 Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte
Teil 4 März 1986 Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch
Teil 5 März 1986 Festmörtel: Bestimmung der Haftscherfestigkeit
Teil 6 November 1987 Festmörtel: Bestimmung der Haftzugfestigkeit
Teil 7 November 1987 Frischmörtel: Bestimmung des Wasserückhaltevermögens nach der Filterplattenmethode
Teil 8 November 1987 Frischmörtel: Bestimmung der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Dünnbettmörteln für Mauerwerk
- DIN 50014 Norm DIN 50014 Juli 1985 Normalklimate
- DIN 51001 Norm DIN 51001 Juli 1983. Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) Allgemeine Arbeitsgrundlagen
- DIN 51220 Norm DIN 51220 Januar 1996 Allgemeines zu Anforderungen an Werkstoffprüfmaschinen und zu deren Prüfung und Kalibrierung
- DIN 52103 Norm DIN 52103 Oktober 1988 Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert

- DIN 52615 Norm DIN 52615 November 1987 Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen
- DIN 52617 Norm DIN 52617 Mai 1987 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen
- DIN 52620 Norm DIN 52620 Mai 1989 Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts von Bau- und Dämmstoffen
- DIN 53211 Norm DIN 53211 Juni 1987 Bestimmung der Auslaufzeit mit dem DIN Becher
- DIN EN 196 Norm EN 196 Prüfverfahren für Zement
Teil 1 März 1990 Bestimmung der Festigkeit
Teil 2 März 1990 Chemische Analyse von Zement
Teil 3 März 1990 Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit
Teil 4 Vornorm November 1993 Quantitative Bestimmung der Bestandteile
Teil 5 März 1990 Prüfung der Puzzolanität von Puzzolanementen
Teil 6 März 1990 Bestimmung der Mahlfeinheit
- DIN EN 459 Norm ENV 459 Baukalk
Teil 1 März 1995 Baukalk; Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung ENV 459-1 : 1994
Teil 2 März 1995 Baukalk; Prüfverfahren
- DIN EN 1015 Norm EN 1015 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk
Teil 10 Entwurf Juni 1993 Bestimmung der Rohdichte von Mörtel
- DROCHYTKA 1988 Drochytka, R.: Studium prubehu koroznich reakci penobetonu s SO₂ a CO₂. Silikaty, 32(1988), S. 85 - 91
- DUTTLINGER 1990 Duttlinger, W.: Die Zerstörung von Natursteinen durch Salze. Untersuchungen am Bauwerk und vergleichende Untersuchungen im Labor. Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität, Dissertation, 1990
- ETTL 1992 Ettl, H. ; Schuh, H.: Putzsicherung mit Ledan TB 1. In: Pursche, J. und Oemig, S.: (Hrsg.) Haftungsprobleme und Putzsicherung an gemauerten und hölzernen Putzträgern, Tagungsbericht Nr. 2, 1992, Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, München 1993, S. 46 - 55

- ETTL 1994 Ettl, H. ; Schuh, H.: Putzsicherung mit Ledan TB 1. Tagungsberichte 12. Internat. Baustofftagung (ibausil), Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, September 1994, Band 2, S. 8 - 16
- EVELYN 1661 Evelyn, J.: Fumifugium; or the inconvenience of the aer and smoake of London dissipadet. - Bedel, G. and Collins, Th., London 1661 ; reprinted for White, B. 1772 ; Old Ashmolean Reprints VIII, Oxford 1930
- EXPERT 1860 zitiert in: Wolf, H.: Sandsteinzerstörungen am Kölner Dom. Mitt. Bauchemie Bautechn., H. 1, I. G. Farbenindustrie Ludwigshafen 1927
- FENSTERBUSCH 1991 Fensterbusch, C.: Vitruv Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und mit Anmerkungen von Dr. C. Fensterbusch, Wissenschaftliche Buschgesellschaft, Darmstadt, 1991
- FIGGEMEIER 1994 Figgemeier, M.: Der Baustoff Lehm im historischen Fachwerkbau. Mineralogische und baustofftechnologische Objekt- und Laboruntersuchungen. Marburg, Philipps-Universität Marburg, Dissertation, 1994
- FRIAS 1991 Frias, M. ; Sanchez de Rojas, M. I. ; Luxan, M. P. ; Garcia, N.: Determination of specific surface area by the laser diffraction technique. Comparison with the blaine permeability method. Cement and Concrete Research, 21(1991), S. 709 - 717
- FRIZOT 1977 Frizot M.: Le mortier romain, mythe ou savoir-faire? in: Comment construisaient les grecs et les romains? (Les dossiers) de l'archéologie), (1977) Nr. 25, S. 60 - 63
- GAURI 1982 Gauri, K. L. ; Popli, R. und Sarma, A. C.: Effect of relative humidity and grain size on the reaction rates of marble at high concentrations of SO₂. Durability of Building Materials, 1(1982/83), S. 209 - 216
- GAURI 1983 Gauri, K. L. ; Gwinn, J. A.: Deterioation of marble in air containing 5 - 10 ppm SO₂ and NO₂. Durability of Building Materials 1(1982/83), S. 217 - 223
- GERTIS 1984 Nannen, D. ; Gertis, K.: Thermische Spannungen in Wärmeverbundsystemen. Bauphysik 4(1984), H. 1, S. 3 - 12
- GHORAB 1979 Ghorab, H. Y.: Thermische und chemische Stabilität der Calciumaluminatsulfathydrate. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1979

- GIPS 1995 Gips-Datenbuch. Herausgeber, Bundesverband Gips und Gipsplattenindustrie, 1. Auflage, 1995
- GMELIN 1957 Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie. 8. Völlig neu bearbeitete Auflage, herausgegeben vom Gmelin-Institut für anorganische Chemie und Grenzgebiete in der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, Verlag Chemie, Weinheim, 1957
- GOMES 1961 Gomes, R. J.: Nota sobre o problema da alteração da pedra em momentos de interesse histórico e artístico. Lab. Nacional Engh. Civil. Memoria No. 165, Lissabon, 1961
- GORETZKI 1994 Goretzki, L.: Zerstörungsvorgänge an Baustoffoberflächen durch Umwelteinflüsse. 12. Internationale Baustofftagung - ibausil, Tagungsbericht Band 2, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar 1994; S. 196 – 205
- GÖDICKE 1995 Gödicke-Dettmering, T. ; Kraus, K. ; Strübel, G.: Der Einfluß des Zuschlags bei der Verwendung von hydraulischem Kalk als Bindemittel von Mörteln zur Restaurierung von Baudenkmälern aus Naturstein. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1(1995), S. 97 - 112
- GRUBE 1991 Grube, H.: Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 52/1991, Düsseldorf, Betonverlag, 1991
- GUNKEL 1983 Gunkel, P.: Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente. Beton-Information, 23(1983), S. 3 - 8
- HANDBOOK 73 Lide, D. R.: Handbook of Chemistry and Physics. 73rd Edition 1992 - 1993, Boca Raton - Am Arbor - London - Tokyo, The Chemical Rubber CO. - CRC Press, 1992, S. 8-35
- HANEEF 1993 Haneef, S. J. ; Jones, M. S. ; Johnson, J. B. ; Thompson, G. E. ; Wood, G. C.: Effects of air pollution on historic buildings and monuments (1986 -1990). Scientific Basis for Conservation: Laboratory Chamber Studies. European Cultural Heritage Newsletter on Research, 7(1993), S. 2 – 9
- HARTLEITNER 1990 Hartleitner, W.: Klebe-Injektionen an Steinskulpturen. Arbeitsblätter für Restauratoren, Gruppe 6 Stein, 23(1990), H. 1, S. 222 - 229
- HENKEL 1955 Henkel, F.: Untersuchungen über die Kohlensäureaufnahme von Mörteln. Zement-Kalk-Gips, 8(1955), S. 386 – 393

- HENKEL 1994 Henkel, S. ; Knöfel, D.: Zur Verträglichkeit von Mörteln für die Betoninstandsetzung. 12. Internationale Baustofftagung - ibausil, Tagungsbericht Band 2, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar, 1994; S. 58 - 66
- HOFESTÄDT 1995 Hofestädt, B.: Der Dom St. Moritz und St. Katharina in Magdeburg. Baugeschichtlicher Überblick. In: Untersuchungsbericht: Ergebnisse der BMFT-Forschung am Magdeburger Dom; Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, Landesamt für Denkmalpflege Sachsen-Anhalt, Regionalleitstelle, Halle, 23.01.1995
- HOFFMANN 1977 Hoffmann, D. und Rooß, H.: Wechselwirkung zwischen Schwefeldioxid und Kalkmörteln. Materialprüfung, 19(1977), S. 300 - 304
- HOFFMANN 1992 Hoffmann, S.: Kalkmörtel - Einfluß verschiedener Faktoren auf die Karbonatisierung und Eigenschaften der Mörtel. Siegen, Universität-GH Siegen, Diplomarbeit, Teil 2, 1992
- HOFFMANN 1994 Hoffmann, D. und Rooß, H.: Zur Erhärtung von Purpasten aus Kalk. Bautenschutz + Bausanierung, 17(1994), S. 48 - 51 und 57 - 63
- HUESMANN 1994 Huesmann, M.: Entwicklungen von sulfatwiderstandsfähigen Fugendeckmörteln und Untersuchungen an Fugendeckmörteln historischer Gebäude. Marburg, Philipps-Universität Marburg, Dissertation, 1994
- IÑIGUEZ 1967 Iñiguez Herrero, J.: Alternation des calcaires et des grès utilisés dans la construction. Eyrolles, Paris, 1967, S. 13 - 50 und 100 - 124
- JEDRZEWSKA 1960 Jedrzewska, H.: Old mortars in Poland: A new method of investigation. Studies in Conservation, 5(1960), S. 132 - 138
- JOHANSEN 1994 Johansen, V. ; Thaulow, N. ; Idorn, G. M.: Dehnungsreaktionen in Mörtel und Beton. Zement-Kalk-Gips, 47(1994), S. 150 - 155
- JOHANSSON 1988 Johansson, L. G. ; Lindqvist, R. E. und Mangiom R. E.: Corrosion of calcareous stones in humid air containing SO₂ and NO₂. Durability of Building Materials, 5(1988), S. 439 - 449
- JONES 1944 Jones, F. E.: The quaternary System CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O at 25 °C. Journal of Physics and Chemistry, 48(1944), S. 311 - 356

- JUDEIKIS 1978 Judeikis, H. S. ; Wren, A. G.: Laboratory measurements of NO and NO₂ deposition onto soil and cement surfaces. Atmospheric Environment, 12(1978), S. 2315 - 2319
- JÜLICH 1993 Jülich, T.: Einleitung. Kunst in Hessen, Band 32/33: Torhalle Lorsch, Darmstadt 1992/93, S. 7 – 8
- KAISER 1907 Kaiser, E.: Über Verwitterungserscheinungen an Bausteinen I. 1. Der Stubensandstein aus Württemberg, namentlich in seiner Verwendung am Kölner Dom. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Band II, 1907, S. 42 - 64
- KEEPE 1683 Keepe, H.: Monumenta Westmonasteriensa: Or an historical account of the original, increase and present state of St. Peter's: or The Abby Church of Westminster. Wilkinson, C. ; T. Dring, London 1683, p. 23
- KIRSTEIN 1986 Kirstein, K. O. ; Stiller, W. ; Bock, E.: Mikrobiologische Einflüsse auf Betonkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau, 81(1986), S. 202 - 205
- KLOPFER 1994a Klopfer, H. ; Mehlmann, M.: Witterungsschutz und Erhaltung von Gebäuden durch hydrophobierte mineralische Putze. Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V. Köln, 1994, Forschungsbericht Nr. 2/94 / M 004 e
- KLOPFER 1994b Lutz, P. ; Jenisch, R. ; Klopfer, H. ; Freymuth, H. ; Krampf, L. ; Petzold, K.: Lehrbuch der Bauphysik. Schall Wärme Feuchte Licht Brand Klima. 3. neubearbeitete und erweiterte Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart 1994
- KNÖFEL 1980 Knöfel, D.: Ursachen der Natursteinverwitterung - Naturstein-schäden an Bauwerken, Teil I und Teil II. Bautenschutz + Bausanierung, 3(1980), S. 48 - 55 und 96 - 103
- KNÖFEL 1983 Knöfel, D.: Zur chemischen und Frost-Tauwechsel-Einwirkung von NaCl - und CaCl₂ - Lösungen sowie deren Gemenge auf Beton. Tagungsbericht Internationales Kolloquium Werkstoff-wissenschaft und Bausanierung, Herausgeber: F. H. Wittmann, Technische Akademie Eßlingen, 1983, S.81 - 86
- KNÖFEL 1985 Knöfel, D. und Böttger, K. G.: Zum Verhalten von zementge-bundenen Baustoffen in SO₂-angereicherter Atmosphäre. Betonwerk + Fertigteil-Technik 51(1985), S. 107 – 114

- KNÖFEL 1989 Knöfel, D.: Ergebnisse chemischer und mineralogischer Untersuchungen von Gesteinsbohrkernen und Proben historischer Mörtel. Bautenschutz + Bausanierung, Sonderheft "Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege", 1989, 2. Statusseminar des BMFT 14. - 15.12.1988, S. 38 - 43
- KNÖFEL 1993 Knöfel, D. und Schubert, P.: Handbuch „Mörtel und Steingeränzungsstoffe in der Denkmalpflege“. Herausgeber: Knöfel, D. und Schubert, P., Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1993
- KNÖFEL 1994 Knöfel, D.: Untersuchung des unterschiedlichen Korrosionsverhaltens von Mörteln bei trockener und nasser Lagerung in mit SO₂-angereicherter Atmosphäre. DFG Abschlußbericht KN 216/6-1, 1994
- KOCH 1960 Koch, A. ; Steinegger, H.: Ein Schnellprüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff. Zement-Kalk-Gips, 13(1960), S, 317 - 324
- KOLLMANN 1977 Kollmann, H. ; Strübel, G. ; Trost, F.: Mineralsynthetische Untersuchungen zu Treibursachen durch Ca-Al-Sulfat-Hydrat und Ca-Si-Carbonat-Sulfat-Hydrat. Tonindustrie-Zeitung, 101(1977), S. 63 – 70
- KOLLMANN 1978 Kollmann, H.: Mineralogische Untersuchungen über Ausblühungs- und Treibkernerscheinungen an Baustoffen durch Sulfate. Gießen, Giessener Geologische Schriften, Nr. 18, 1978
- KOLLMANN 1981 Kollmann, H. ; Strübel, G.: Ettringit-Thaumasit-Mischkristalle von Brenk (Eifel). Chem. Erde, 40(1981), S. 110 - 120
- KOTTAS 1964 Kottas, H.: Das Resonanzverfahren zur Messung mechanischer Schwingungen und Materialeigenschaften. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 72(1964), S. 199 - 204
- KRAUS 1989 Kraus, K. ; Wissler, S. ; Knöfel, D.: Über das Löschen von Kalk vor der Mitte des 18. Jahrhunderts - Literaturlauswertung und Laborversuche. Arbeitsblätter für Restauratoren, Gruppe 6, Stein, 22(1989), S. 206 - 221
- KRUMBEIN 1966 Krumbein, W. E.: Zur Frage der Gesteinsverwitterung (über geochemische und mikrobiologische Bereiche der exogenen Dynamik). Würzburg, Universität Würzburg, Dissertation, 1966
- KRUMBEIN 1973 Krumbein, W. E.: Über den Einfluß von Mikroorganismen auf die Bausteinverwitterung - eine ökologische Studie. Deutsche Kunst- und Denkmalpflege, 31(1973), S. 54 – 71

- KÜNZEL 1989 Künzel, H.: Wärmestau und Feuchtestau als Ursache von Putzschäden bei Wärmedämmverbundsystemen. Aachener Bausachverständigentage 1989, Mauerwerkswände und Putz, S. 109 - 114, Bauverlag Wiesbaden und Berlin, 1989
- KÜNZEL 1994 Künzel, H.: Schäden an Fassadenputzen. Herausgeber: Zimmermann, G., Schadenfreies Bauen, Bd. 9, Stuttgart, IRB-Verlag, 1994
- KÜNZEL 1996 Künzel, H.: Putze in der Denkmalpflege. WTA-Bericht Herausgeber: Helmuth Venzmer, REDIFICATIO Verlag, Freiburg, 12(1996), S. 103 - 115
- KUZEL 1968 Kuzel, H.-J.: Ersatz von Al^{3+} durch Cr^{3+} und Fe^{3+} in $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ und $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot n\text{H}_2\text{O}$. Zement-Kalk-Gips 21(1968), S. 493 - 499
- KUZEL 1970 Kuzel, H.-J.: Röntgenuntersuchungen im System $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot n\text{H}_2\text{O} - 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot n\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$. Neues Jahrbuch für Mineralogie, 1970; S. 193 - 200
- KUZEL 1989 Kuzel, H.-J. ; Strohmaier, G.: Reaktionen bei der Einwirkung von CO_2 auf wärmebehandelte Zementsteine. Zement-Kalk-Gips, 42(1989), S. 413 - 418
- LAMBRECHT 1990 Lambrecht, L.: Zur Problematik der Hinterfüllung loser Gesteinsschollen und die Entwicklung einer modifizierten Tränkungsmethode am Beispiel der Parkfigur „Allegorie des Sommers“ aus Wesel/Obrighofen. Köln, Fachhochschule Köln, Diplomarbeit, 1990
- LAURIE 1925 Laurie, A. P.: Stone decay and preservation of building. J. Soc. Chem. Ind. Trans. 44(1925), S. 86T - 92T
- LEA 1956 Lea, F. M.: The chemistry of cement and concrete. London, (revised Edition of Lea & Desch), 1956, S. 294ff und S. 553ff
- LEHMKUHL 1990 Lehmkuhl, T.: Injektionsfähige Hinterfüllmassen auf der Basis kolloidaler Kieselsäuredispersion zur Fixierung dünner Schuppen und Schalen an Objekten aus Baumberger Sandstein. Köln, Fachhochschule Köln, Diplomarbeit, 1990
- LEHMKUHL 1994 Lehmkuhl, T.: Injektionsfähige Hinterfüllmassen auf Basis kolloidaler Kieselsäuredispersion zur Fixierung dünner Schuppen und Schalen an verwitterten Steinobjekten. Arbeitsblätter für Restauratoren, Gruppe 6 Stein, 27(1994), H. 2, S. 319 - 322

-
- LEA 1970 Lea, F. M.: The chemistry of cement and concrete. London, 3rd Edition, 1970, S. 221 - 225, 348
- Lindqvist 1994 Lindqvist, J. E. ; Schouenborg, B. ; Sandström, M.: Comprehensive studies if old mortars from three medieval churches in southern Sweden. Proceedings of the 16th International Conference on Cement Microscopy, Richmond, 11.4 - 14.4.1994, S. 306 - 322
- LIS 1981a Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NRW, Essen, (1981) H. 54
- LIS 1981b Februar 1981 - Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. Monatsbericht über die Luftqualität an Rhein und Ruhr, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Februar 1981
- LIS 1983 Februar 1983 - Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. Monatsbericht über die Luftqualität an Rhein und Ruhr, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Februar 1983
- LOCHER 1973 Locher, F. W. ; Sprung, S.: Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion im Beton. Beton, 23(1973), S. 303 - 306 und S. 349 - 353
- LOCHER 1980 Locher, F. W. ; Richartz, W. ; Sprung, S.: Erstarren von Zement, Teil II: Einfluß des Calciumsulfat-Zusatzes. Zement-Kalk-Gips, 33(1980), S, 271 - 277
- LOCHER 1986 Locher, D.: Hydratation und Festigkeitsentwicklung von Klinkermineralmischungen. Clausthal-Zellerfeld, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 1986
- LORSCH 1980 Heimat- und Kulturverein Lorsch: Beiträge zur Geschichte des Klosters Lorsch. Sonderband 4, 2. verbesserte Auflage, Schriftleitung Paul Schnitzer, Otto KG, 1980
- LUCKAT 1981 Luckat, S.: Quantitative Untersuchung des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Naturstein. Forschungsbericht 106 08 003/02, Umweltbundesamt Berlin, 1981
- LUDWIG 1982 Ludwig, U.: Alkali-Zuschlag-Reaktion im Beton. Tonindustrie-Zeitung, 106(1982), S. 2 - 5

- LUKAS 1975 Lukas, W.: Betonzerstörung durch SO₃-Angriff unter Bildung von Thaumasit und Woodfordit. Cement and Concrete Research, 5(1975), S. 503 - 517
- MALINOWSKI 1993 Malinowski, R., Frifelt, K.: Prehistoric hydraulic mortar. The ubaid period 5 - 4000 bc. Swedish Council for Building Research to the Chalmors, No. 900751-4, D12: 1993, Technical University of Gothenberg, Svenk Byggtjänst, S-171 - 188, Söna, Schweden
- MANGIO 1989 Mangio, R. E. und Johansson, L. G.: The influence of ozone on atmospheric corrosion of Carrara Marble in humid atmospheres containing sulfur dioxide; deposition studies of SO₂, on marble. 11th Scandinavian Corrosion Congress, Stavanger, F45, S. 1 - 6, 1989
- MANN 1992 Mann, W. ; Betzler, M. ; Baumgartner, B. ; Wölfel, E.: Schalenförmige Abplatzungen an der gemauerten Auskleidung eines Eisenbahntunnels als Folge chemischer Umwandlung des Mörtels in Gipsmörtel durch Rauchgase. Mauerwerk-Kalender, 1992, S. 639 - 642
- MANNS 1979 Manns, W. und Schönfelder, R.: Der Einfluß von Mörtelzusatzmitteln auf die Festigkeit von Mauermörtel. Ziegelindustrie 32 (1979) S. 80 - 92
- MASSARI 1985 Massari, I.: Ricerca finalizzata al consolidamento di strutture supporto di intonaci, consolidamento e fissaggio di stucchi, per un migliore intervento conservativo e di recupero dei beni di interesse artistico e storico danneggiati dal sisma del novembre 1980 e febbraio 1981. Rom, Ministero per i beni culturali ed ambientali (Sopraintendenza per i beni artistici e storici della basilicata), Koordinator Massari, 1985
- MCEDLOV-PETROSJAN 1966 Mcedlov-Petrosjan, O. P.: Thermodynamik der Silikate. 2. Auflage, VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin, 1966, S. 251 ff
- MEHLMANN 1984 Mehlmann, M. ; Droll, K.: Einfluß von Zusatzmitteln auf den Haftverbund Mörtel/Stein durch die Veränderung des Gefüges in der Haftzone. Forschungsbericht Nr. 1/84, Forschungsgemeinschaft der deutschen Kalkindustrie, 1984

- MEHLMANN 1988 Mehlmann, M.: Wechselwirkung von Putzsystemen mit sauren Inhaltsstoffen (insbesondere SO₂). Bautenschutz + Bausanierung 11(1988), S. 157 - 162
- MEHR 1986 Mehr, S.: Entwicklung von sulfatbeständigen Mörteln auf Zement-Hüttensand-Puzzolan-Basis. Aachen, Rheinisch-Westfälische-Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1986
- MERCK 1996 Reagenzien • Chemikalien • Diagnostica. Merck Katalog 1996. Darmstadt, Merck KGaA, 1995
- MEHTA 1973 Mehta, P. K.: Mechanism of expansion associated with ettringite formation. Cement and Concrete Research, 3(1973), S. 1 - 6
- MEHTA 1976 Mehta, P. K.: Scanning electron micrographic studies of ettringite formation. Cement and Concrete Research, 6(1976), S. 169 - 182
- MEHTA 1982 Mehta, P. K.: Expansion of ettringite by water adsorption. Cement and Concrete Research, 12(1982), S. 121 - 122
- METZ 1992 Metz, F.: Zur Charakterisierung von Porenraum und ausgewählten Gebrauchseigenschaften verschiedener Natursteine. Untersuchungen mit technologischen und physikalischen Verfahren. HochschulSammlung Naturwissenschaft, Mineralogie Band 2, Hochschul-Verlag, Freiburg, Siegen, Universität-GH Siegen, Dissertation, 1992
- MICHAELIS 1892 Michaelis, W.: Der Zementbazillus. Tonindustrie-Zeitung, 16(1892), S. 105 - 106
- MICHAELIS 1896 Der alte Mörtel des Hochschlosses Marienburg. Deutsche Töpfer- und Ziegler-Zeitung, 27(1896), S. 33 - 35 und 41 - 44
- MIDDENDORF 1994 Middendorf, B.: Charakterisierung historischer Mörtel aus Ziegelmauerwerk und Entwicklung von wasserresistenten Fugenmörteln auf Gipsbasis. Siegen, Universität-GH Siegen, Dissertation, 1994
- MILDE 1983 Milde, K. ; Sand, W. ; Wolff, W. ; Bock, E.: Thiobacilli of corroded concrete walls of the Hamburg sewer system. Journal Of General Microbiology 129(1983), S. 1645 - 1648
- MOSE 3 Altes Testament, 3. Buch Mose, 14. Kapitel, Vers 33 – 57

- MÜLLER 1964 Müller, G.: Sediment Petrologie - Teil 1, Methoden der Sediment-Untersuchungen, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart 1964, S. 154 - 157
- MÜNCHBERG 1970 Leifeld, G. ; Münchberg W. ; Stegmaier, W.: Ettringit und Thaumazit als Treibursache in Kalk-Gips-Putzen. Zement-Kalk-Gips, 23(1970), S. 174 - 177
- NEY 1966 Ney, P.: Der Einfluß der Erhärtungsbedingungen auf die Kristallisationsformen des Calciumcarbonates. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1719, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, 1966
- NEY 1967 Ney, P.: Die Erhärtung von Luftkalkmörteln als Kristallisationsvorgang. Zement-Kalk-Gips, 20(1967), S. 429 - 434
- NIEMEYER 1986 Niemeyer, W. und Kollo, H.: Beispielhaft für dauerhaften Stahlbeton: Der Dortmunder Aussichts- und Fernmeldeturm. Beton-Information 26(1986), S. 41 - 43
- NIESEL 1979 Niesel, K.: Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre - Literaturdiskussion. Fortschritte des Mineralogie, 57(1979), S. 68 - 124
- NIESEL 1994 Niesel, K.: Zum Problem des Nachstellens von Kalkmörteln. Bautenschutz + Bausanierung, 17 (1994), S. 65 - 68
- NISHIKAWA 1992 Nishikawa, T. ; Suzuki, K. ; Ito, S.: Decomposition of synthesized ettringite by carbonation. Cement and Concrete Research 22(1992), S. 6 - 14
- NOURSE 1700 Nourse, T.: An essay upon the fuel of London. - In: Compania Foelix or, a Discourse of the benefits and improvements of husbandry. Printed for Bennet, Th., London 1700, S. 345 - 364 + 2 pp
- NÜRNBERGER 1973 Nürnberger, U.: Zur Frage des Spannungskorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in nitrathaltiger Umgebung. Eisenhüttenwerk 44(1973), S. 775 - 784
- OPPERMANN 1973 Oppermann, B.: Die Beständigkeit von Baustoffen und synthetisch hergestellten Calciumsilikaten gegenüber Schwefeldioxid. Clausthal, TH Clausthal, Dissertation, 1973

- PENKALA 1988 Pekala, B. ; Zason, H.: Lime Mortars in Ancient Roman Buildings of Alexandria. In: Proceedings of the VIth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, 12. - 14.09.1988, Nicholas Copernicus University, 1988, S. 375 - 380
- PERSEKE 1982 Perseke, C.: Die trockene und feuchte Deposition säurebildender atmosphärischer Spurenstoffe. Frankfurt, Universität Frankfurt, Dissertation, 1982
- PIEPENBURG 1951 Piepenburg, W.: Versuche zum Festigkeitsnachweis für Baukalk. Zement-Kalk-Gips, 4(1951), Heft 2, S. 27 - 33
- PIEPER 1987 Pieper, K. ; Hempel, R.: Schäden durch Sicherungsmaßnahmen an Bauten mit Gipsmörtel. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, DFG Jahrbuch 1987, Sonderforschungsbereich 315, S. 73 - 88
- POHL 1955 Pohl, G.: Der Einfluß von SO₄-Ionen beim Löschen von Weißkalk. Zement-Kalk-Gips, 8(1955), S. 393 - 397
- POHL 1956 Pohl, G.: Einige physikalische und chemische Untersuchungen über das Brennen und Löschen von Kalk. Zement-Kalk-Gips, 9(1956), S. 275 - 284
- PÜHRINGER 1992 Weber, J. ; Makes, F. ; Pühringer, J.: Ein Mechanismus des Chloridangriffes auf OPZ. Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3, Hrsg.: F. Wittmann, expert-Verlag, Ehningen, 1992, S. 1494 - 1519
- PÜHRINGER 1993 Pühringer, J.: Zum chemischen Angriff auf Portlandzement OPZ - Ein Diskussionsbeitrag. Bautenschutz + Bausanierung 16(1993), S. [117 - 118]
- PURSCHE 1993 Pursche, J. und Oemig, S.: (Hrsg.) Haftungsprobleme und Putzsicherung an gemauerten und hölzernen Putzträgern, Tagungsbericht Nr. 2, 1992, Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, München 1993
- darin:**
1. Böttger, K. G. und Knöfel, D.: Entwicklung und Prüfung von Haftmörteln mit hohem Sulfatwiderstand. S. 18-25
 2. Knöfel, D. und Böttger, K. G.: Putzmörtel der Torhalle Lorsch, S. 34.

- RADERMACHER 1990 Radermacher, L. ; Schwela, D. ; Prinz, B.: Ergebnisse von Depositionsmessungen zu Ermittlung des Ferntransportes von Luftverunreinigungen. In: Aus der Tätigkeit der LIS 1990, Landesanstalt für Immissionsschutz, 1990, S. 33 - 56
- ROMBERG 1978 Romberg, H.: Zementsteinporen und Betoneigenschaften, Beton-Information, 18(1978), S. 50 - 55
- RÖCK 1982 Röck, R. ; Lukas, W.: Phasenänderung durch die nachträgliche Einwirkung von Chlorid auf Hydrate des Systems $C_3A-CaSO_4-Ca(OH)_2$. Zement-Kalk-Gips, 35(1982), S. 328 - 332
- RÖSSLER 1979 Rössler, H. J.: Lehrbuch der Mineralogie. 5. unveränderte Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1991
- SAND 1989 Sand, W. ; Ahlers, B. ; Krause-Kupsch, T. ; Meinicke, M. ; Krieg, E. ; Diercks, M. ; Sameluck, F. ; Bock, E.: Mikroorganismen und ihre Bedeutung für die Zerstörung von mineralischen Baustoffen. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, 3(1989), S. 36 - 40
- SCHÄFER 1988 Schäfer, J. ; Hilsdorf, H. K.: Untersuchung historischer Mörtel. Zwei Bauphasen der Entenburg in Pfohren bei Donaueschingen. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahrbuch 1988, Sonderforschungsbereich 315, Ernst und Sohn, Berlin, 1988, S. 183 - 189
- SCHÄFER 1993a Schäfer, J. ; Hilsdorf, H. K.: Historische Mörtel und ihr Ersatz - Untersuchungen zu Zusammenhang zwischen Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Hrsg.: F. Wittmann, expert-Verlag, Ehningen, 1993, S. 1178 - 1199
- SCHÄFER 1993b Schäfer, J. ; Hilsdorf, H. K.: Ancient and new lime mortars - the correlation between their composition structure and properties. Conservation of Stone and other materials, Proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress 1993, Vol. 2. Verlag: E. & FN Spon, London, S. 629 - 636
- SCHAFFER 1933 Schaffer, R. J.: The weathering of natural building stones. Building Research Spec. Rep. No. 18, London 1933, H. M. Stationary Office, 149 pp
- SCHÄRER 1980 Schärer, B.: Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid - Ursachen, Wirkungen, Minderung. Bundesminister des Innern, Berlin 1980

- SCHLÜTTER 1995 Schlütter, F.: Untersuchungsbericht zur Nullbeprobung und 1. Folgebeprobung an der Musterfläche 1 der Terrakottarelieftafeln am Schweriner Schloß (Giebel über dem Kirchenchor). Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen, 1995
- SCHOLL 1991 Scholl, E.: Zum Einfluß säurebildender Atmosphärenteilchen auf zementgebundene Baustoffe. Siegen, Universität-GH Siegen, Dissertation, 1991
- SCHOLZ 1993 Scholz, S.: Die frühe Baugeschichte des Klosters Lorsch im Spiegel der schriftlichen Überlieferung. Kunst in Hessen, Band 32/33: Torhalle Lorsch, Darmstadt 1992/93, S. 65 - 70
- SCHOSTAK 1995 Schostak, V. ; Fünders, B. ; Recker, G. ; Drescher, G. ; Juling, H.: Konservierungstechniken für die Wandmalerei in der Kirche in Eilsum/Ostfriesland. Restauro, 4(1995), S. 252 - 258
- SCHUBERT 1990 Schubert, P. ; Knöfel, D.: Zur Beurteilung von Putzmörteln für historische Bauwerke. Bautenschutz + Bausanierung, 13(1990), S. 67 - 74
- SCHUBERT 1993 Schubert, P.: Zur Beurteilung von Putzmörteln für historische Bauwerke. In: Knöfel 1993b, S. 107 - 122
- SCHULZ 1984 Schulz, R.-R.: Beton als Beschichtungsuntergrund - über die Prüfung des Festigkeitsgehaltes von Betonoberflächen mit dem Abreißversuch. Dissertation, Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1984
- SCHULZE 1993 Schulze, J.: Bausanierung mit Dispersionspulvern SPCC. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Hrsg.: F. Wittmann, expert-Verlag, Ehningen, 1993, S. 1138-1153
- SCHURATH 1980 Schurath, U.: Luftchemisches Verhalten von NO_x. Luftchemisches Verhalten anthropogener Schadstoffe. Ergebnisse der VDI-Arbeitsgruppe Luftchemie, Düsseldorf, 1980, S. 36 - 42
- SCHWEDEN 1973 Schweden, K.: Anforderungen an die Eigenschaften der Zwischenprodukte im Kalkwerk - Hydrat aus Weichbrand, Zement-Kalk-Gips, 26(1973), S. 337 - 342
- SCHWIETE 1964 Schwiete, H. E. ; Ludwig, U. ; Jäger, P.: Untersuchungen im System 3 CaO·Al₂O₃-CaSO₄-CaO-H₂O. Zement-Kalk-Gips 17(1964), S. 229 - 236

- SILVERMAN 1979 Silverman, M. P.: Biological and organic chemical decomposition of silicates. *Studies in Environmental Science*, 3(1979), S. 445 - 465
- SMOLCZYK 1961 Smolcyk, H.-G.: Die Ettringit-Phasen im Hochofenzement. *Zement-Kalk-Gips*, 14(1961), S. 277 - 283
- SMOLCZYK 1969 Smolcyk, H.-G.: Concrete in strong chloride solutions. RILEM-Symposium - Durability of Concrete, Prag 1969, Preliminary Report, Part II, A. 113 - 126
- SO₂NRW Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, TEMES Monatsberichte Dezember 1993 und Juli 1994 - Luftqualität in Nordrhein-Westfalen
- STANTON 1940 Stanton, T. E.: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 66(1940), S. 1781ff
- STARK 1994 Eckart, A. ; Ludwig, H.-M. ; Stark, J.: Zur Hydratation der vier Hauptklinkerphasen des Portlandzements. Tagungsberichte 12. Internat. Baustofftagung (ibausil), Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, September 1994, Band 3, S. 365 - 379
- STEIN 1963 Stein, H. N.: Some characteristics of the hydration of 3CaO·Al₂O₃ in the presence of CaSO₄·2H₂O. *Silicates Industriels*, 28(1963), S. 141 - 145
- STRÜBEL 1992 Strübel, G. ; Kraus, K. ; Kuhl, O. ; Gödicke-Dettmering, T.: Hydraulische Kalke in der Denkmalpflege. Institut für Steinkonservierung, e. V., Bericht Nr. 1, Wiesbaden, 1992
- STÜRMER 1993 Stürmer, S. ; Mielke, I.: Verträglichkeitsuntersuchungen Teil I: Verträglichkeitsuntersuchungen mit verschiedenen Bindemitteln und Altmaterial. *Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar*, 39(1993), S. 99 - 105
- TAYLOR 1968 Moore, A. E. ; Taylor, H. F. W.: Crystal structure of ettringite. *Nature*, London, 218(1968), S. 1048 - 1049
- TAYLOR 1969 Edge, R. A. ; Taylor, H. F. W.: Crystal structure of thaumasite, a mineral containing [Si(OH)₆]²⁻-groups. *Nature*, London, 224(1969), S. 363 - 364
- THOMAS 1991 Thomas, L.: Amtlicher Führer Michelstadt-Steinbach Einhardbasilika. Herausgegeben im Auftrag der Verwaltung der Staatlichen Schlösser und Gärten in Hessen, 2. Auflage, Bad Homburg, 1991

- TRAUTMANN 1992 Trautmann, I.: Entwicklung eines Mörtels aus Hüttensand, Gips und Portlandzement (H-G-Z) zur Injektion in mehrschaliges Mauerwerk. Marburg, Philipps-Universität Marburg, Dissertation, 1992
- TRAUTMANN 1993 Trautmann, I. ; Knöfel, D.: Entwicklung eines Hüttensand-Gips-Portlandzement-Mörtels (H-G-Z-Mörtels) zur Injektion in mehrschaligem Mauerwerk. Teil 1, Zement-Kalk-Gips, 46(1993), S. 95 - 101
- TRAUTMANN 1994 Trautmann, I. ; Knöfel, D.: Entwicklung eines Hüttensand-Gips-Portlandzement-Mörtels (H-G-Z-Mörtels) zur Injektion in mehrschaligem Mauerwerk. Teil 2, Zement-Kalk-Gips, 46(1993), S. 219 - 224
- UBA 1995 Umweltdaten Deutschland 1995, Umweltbundesamt Berlin, 1995
- VALES 1986 Vales, J. und Martin, A.: Deterioration of calcareous stone in simulated atmospheres. Durability of Building Materials 3(1986), S. 197 - 212
- VAN AARDT 1975 van Aardt, J. H. P. ; Visser, S.: Thaumasite formation : A cause of deterioration of portland cement and related substances in the presence of sulphates. Cement and Concrete Research, 5(1975), S. 225 - 232
- VAN BAALEN 1991 Van Baalen, K.: Karbonatatie van Kalkmortel en haar Invloed op historische Structuren. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Fakulteit Toegepaste Wetenschappen, 1991
- VITRUV siehe: FENSTERBUSCH 1991
- VOGT 1994 Vogt, R. ; Goretzki, L. ; Henning, O.: Der Einfluß von Salzen auf das hygri sche Verhalten von Baustoffen. Bautenschutz + Bausanierung 17(1994), H. 2, S. 59 - 64 und H. 3, S. 34 -39
- WARSCHEID 1990 Warscheid, T.: Untersuchungen zur Biodeterioration von Sandsteinen unter besonderer Berücksichtigung der chemoorganotrophen Bakterien. Oldenburg, Universität Oldenburg, Dissertation, 1990
- WARSCHEID 1994 Warscheid, T. ; Krummbein, W. E.: Biodeteriorationsprozesse an anorganischen Werkstoffen. Werkstoffe und Korrosion 45(1994), S. 105 - 113
- WARSCHEID 1995 Warscheid, T.: Persönliche Mitteilung. 1995

- WASHBURN 1921 The Dynamics of capillary flow. The Physical Review; Second Series, 17(1921), S. 273 - 283
- WENDLER 1993 Wendler, E. ; Rückert-Thümling, R.: Gefügezerstörendes Verformungsverhalten bei salzbefrachteten Sandsteinen unter hygrischer Wechselbelastung. Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3, Hrsg.: F. Wittmann, expert-Verlag, Ehningen, 1992, S. 1818 - 1830
- WERNER 1986 Werner, A.: Sanierung von Kirchenbauten an der Elbe. baustanz, (1986), H. 5, S. 36 - 40
- WESCHE 1966 Wesche, K. H. ; Manns, W.: Betone aus Sulfathüttenzement in höherem Alter. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 1966, Heft 186
- WINKLER 1973 Winkler, E. M.: Stone: Properties, Durability in Man's Environment. Springer-Verlag, Wien, New York 1973
- WINNEFELD 1996 Winnefeld, F. ; Böttger, K. G. ; Knöfel, D.: Eigenschaften von Baukalken mit unterschiedlich hohen hydraulischen Anteilen. 4th International Colloquium: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, vom 17. - 19.12.1996, Band 2, S. 801-815
- WISSER 1989 Wisser, S.: Historische und moderne Mörteln im Verbund mit Naturstein: Chemisch mineralogische und mörteltechnische Eigenschaften. Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Dissertation, 1989
- WOLFF 1972 Wolff, A.: Kölner Domblatt 35(1972), S. 7 - 28
- WOLTERS 1870 Wolters, W.: Mitteilungen aus dem chemisch-technischen Laboratorium zu Braunschweig. VI Kalk und (Luft-) Mörtel. Dingler's polytechn. J. (1870), Bd. 196, S. 343 - 356
- ZAPPIA 1992 Zappia, G. ; Sabbioni, C. ; Pauri, M. G. und Gobbi, G.: Effects of SO₂-enriched atmosphere an ancient and modern building materials. Materials Engineering 3(1992), S. 445 - 458
- ZEHNDER 1982 Zehnder, K.: Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie 61(1982)
- ZIER 1989 Zier, H.-W. ; Weise, G.: Untersuchungen zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Mischungsverhältnissen, Zuschlagstoffparametern und Druckfestigkeiten bei Putzmörteln. Bontotechnik (1989) Heft 1, S. 26 - 30

10 Anhang

Tabelle A1: Übersicht über die verwendeten Abkürzungen

3000 E	Borosilikatvollglaskugeln
AM	Ausbreitmaß
α_T	Wärmedehnungskoeffizient
B/Z _{Ca(OH)₂}	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf Ca(OH) ₂
B/Z _{CaCO₃}	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf CaCO ₃
B/Z _{CaO}	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf CaO
Blaine	spez. Oberfläche nach der Blaine Methode bestimmt
BVK	Borosilikat-Vollglaskugeln
β_{BZ}	Biegezugfestigkeit der Mörtel, das Alter der Proben ist angehängt
β_D	Druckfestigkeit der Mörtel, das Alter der Proben ist angehängt
β_{HZ}	Haftzugfestigkeit, das Alter der Proben ist angehängt
β_Z	Zugfestigkeit, das Alter der Proben ist angehängt
Cc	Calciumcarbonat
CL 90, 80, 70	Weißkalk mit 90, 80, 70 M.-% CaO und MgO
CL90/1	Branntstückkalk CL 90, 1. Lieferung
CL90/2	Branntstückkalk CL 90, 2. Lieferung
CL90/3	Branntstückkalk CL 90, 3. Lieferung
Cs	Gips
E _{dyn}	dynamischer E-Modul
Em	Emulgator für PUR
ϵ_q	Quellen (hygrisches Quellen)
ϵ_{s1}	1. Schwinden (chemisches- und Trocknungsschwinden)
ϵ_{s2}	2. Schwinden (Trocknungsschwinden)
ϵ_{sF}	Schwinden in der Form (chemisches Schwinden (Bindemittel mit hydraulischen Anteilen) bzw. hygrisches Schwinden (Bindemittel ohne Hydraulikfaktoren))
ϵ_u	Sorptionsdehnung, Dehnung durch Feuchteaufnahme bei der Bestimmung der Sorptionsisothermen
F10	Verflüssiger für Kalkmörtel, pulverförmig
FM	Fließmittel für Hinterfüllmörtel, pulverförmig
FTW	Frost-Tauwechsel-Widerstand
Gips	Rohgips, CaSO ₄ ·2H ₂ O
GT	Gewichtsteil
HGK	Borosilikat-Hohlglaskugeln
HGZ	zusammengesetzt aus 83 M.-% HüS, 10 M.-% Gips und 7 M.-% PZ
HOZ	Hochofenzement HOZ 35 L-NW HS/NA, heute CEM III/B 32,5 HS/NA
HOZ+	Bindemittel zusammengesetzt aus: 70 M.-% HOZ und 30 M.-% Kalksteinmehl
HüS	Hüttensand gemahlen
IH	Injektionshilfe für Mikro
k'-Wert	Körnungsziffer
Kd L	flüssige Kunststoffdispersion: Copolymere Styrol/Acrylat-Dispersion
Kd P	Kunststoffdispersionspulver: Vinylacetat-Vinylester-Copolymerisat Pulver

Kd	Kunststoffdispersion
KStM	Kalksteinmehl
MC	Methylhydroxyethylcellulose, Viskosität 20000-25000 mPa
Mikro	hochfeiner Hochofenzement für Injektionsmörtel
\dot{m}_{knick}	Verdunstungsmassenstromdichte
μ -Wert	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl
O_i	innere Oberfläche nach Brunauer, Emmett und Teller über Wasserdampf bestimmt
ω	Wasseraufnahmekoeffizient
PUR	lösemittelfreies, in Wasser emulgierbares Polyisocyanat
PZ	Portlandzement PZ 45 F HS/NA, heute CEM I 42,5 R HS/NA
ρ	Dichte
ρ_f	Frishmörtelrohddichte
ρ_R	Festmörtelrohddichte, das Alter der Proben in Tagen ist angehängt
sp. O.	spez. Oberfläche aus der Kornverteilung der Lasergranulometrie berechnet
SP10	Quarzmehl mit einem Siebdurchgang bei 63 μm von 99,5 M.-%
ST	Stabilisator ST1
t_{knick}	Zeitpunkt des Übergangs von einem zum anderen Trocknungsabschnitt
TZ+	Bindemittel zusammengesetzt aus: 70 M.-% TZ und 30 M.-% KStM
TZ++	Bindemittel zusammengesetzt aus: 33,3 M.-% TZ, 33,3 M.-% HüS und 33,3 M.-% Kalksteinmehl
u_m	massebezogene Feuchte eines Stoffes
u_{m53}	massebezogene Ausgleichsfeuchte eines Stoffes bei einer rel. Luftfeuchte von 53 %
u_{m80}	massebezogene Ausgleichsfeuchte eines Stoffes bei einer rel. Luftfeuchte von 80 %
u_v	volumenbezogene Feuchte eines Stoffes
W/B	Wasser/Bindemittelwert
w_0	flächenbezogener Wassergehalt
WA	Wasseranspruch
w_{ab}	Wasserabgabegrad
w_{ab24}	Wasserabgabegrad nach 24 h
w_{ak}	Wasserabgabekoeffizient
WKH	Weißkalkhydrat CL 90
w_{kn}	Verhältnis der im Trocknungsabschnitt abgegebenen flächenbezogenen Wassermenge zum flächenbezogenen Wassergehalt zu Beginn der Messung
w_{knick}	flächenbezogener Wassergehalt am Knickpunkt
w_m	Wasseraufnahmegrad nach DIN 52103
w_{m24}	Wasseraufnahmegrad nach 24 Stunden
w_{mA}	Wasseraufnahmegrad nach DIN 52103, Verfahren A
w_{mV}	Wasseraufnahmegrad nach 24 stündiger Lagerung im Vakuum bei 50 hPa
WRV	Wasserrückhaltevermögen

Tabelle A2: „Gebietsbezogene Meßergebnisse für Stoffeinträge und physikalische Kenngrößen - Mittelwerte über die Jahre 1984 bis 1989“¹²⁰

Gebiet	1	2	3	4	
Komponente	Ruhrgebiet	Eifel	Weserberg- land	Teutoburger Wald/Egge- gebirge	Einheit
Regenmenge	3,0	3,7	2,6	3,5	l/m ² d
pH	4,7	4,6	4,7	4,5	
Leitfähigkeit	41,0	31,9	36,7	35,3	µS/cm
Nitrat	9,1	9,9	8,2	11,0	mg/(m ² ·d)
Sulfat	19,1	14,8	11,5	15,5	mg/(m ² ·d)
H ⁺ -Ionen	79,9	113,3	78,2	122,0	mg/(m ² ·d)
Chlorid	5,4	6,4	4,8	5,7	mg/(m ² ·d)
Fluorid	0,4	0,1	0,1	0,2	mg/(m ² ·d)
Calcium	5,0	1,7	2,1	1,8	mg/(m ² ·d)
Ammonium	3,9	4,4	4,9	4,7	mg/(m ² ·d)
Kalium	1,1	1,3	1,5	1,3	mg/(m ² ·d)
Magnesium	0,8	0,5	0,4	0,4	mg/(m ² ·d)
Natrium	2,6	2,4	2,4	2,6	mg/(m ² ·d)

Tabelle A3: Bezeichnung der Baukalke nach der DIN 1060

Baukalkart nach DIN 1060 alt (1986)	Abkürzung innerhalb dieser Dissertation	Baukalkart nach DIN 1060 neu (1995)	Abkürzung nach der Norm
-	CL90 WKH	Weißkalk 90*	CL 90*
Weißfeinkalk Weißkalkhydrat	WFK WKH	Weißkalk 80*	CL 80*
Wasserfeinkalk Wasserkalkhydrat	WaFK WaHK	Weißkalk 70*	CL 70*
Dolomitfeinkalk Dolomitkalkhydrat	DFK DKH	Dolomitkalk 85*	DL 85*
-	-	Dolomitkalk 80*	DL 80*
hydraulischer Kalk	HK	hydraulischer Kalk 2**	HL 2**
-	-	hydraulischer Kalk 3,5***	HL 3,5***
hochhydraulischer Kalk	HHK	hydraulischer Kalk 5****	HL 5****

* Ziffer nennt den geforderten Gehalt an CaO und MgO

** geforderte Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen 2-7 N/mm² (DIN ENV 459-1)

*** geforderte Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen 3,5-10 N/mm², zusätzlich wird eine Mindestfestigkeit nach 7 Tagen von 1,5 N/mm² gefordert (DIN ENV 459-1)

**** geforderte Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen 5-15 N/mm², zusätzlich wird eine Mindestfestigkeit nach 7 Tagen von 1,5 N/mm² gefordert (DIN ENV 459-1)

Tabelle A4: Molekularmassen, Dichten und Molvolumina der für Reaktionsgleichungen verwendeten chemischen Verbindungen, aus GMELIN 1957, RÖSSLER 1979, TAYLOR 1991, MERCK 1996

Chemische Formel	Mineralogischer Name oder chem. Bezeichnung	Molmasse / g/mol	Dichte / g/cm ³	Molvolumen / cm ³ /mol
Al ₂ O ₃	α-Al ₂ O ₃	101,96	3,9-4,1	25,49
Al ₂ O ₃	γ-Al ₂ O ₃	101,96	3,9-4,1	25,49
Al(OH) ₃	Gibbsit	78,00	3,44	31,97
MgSO ₄ ·7H ₂ O	Epsomit	246,47	1,68	146,71
CaO·CaCl ₂ ·2H ₂ O	Calciumoxychlorid	203,10	2,25	90,26
CaCl ₂	Hydrophilit	110,99	2,14	51,80
CaCO ₃	Calcit	100,09	2,71	36,93
Ca(OH) ₂	Portlandit	74,09	2,24	33,08
CaSO ₄ ·2H ₂ O	Gips	172,17	2,31	74,53
MgCO ₃ ·3H ₂ O	Nesquehonit	138,36	1,85	74,71
MgSO ₄ ·7H ₂ O	Epsomit	246,47	1,68	146,71
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	Soda, Natrit	286,14	1,45	197,34
NaOH	Natronlauge	40,00	2,13	18,78
NaCl	Halit	58,44	2,10	27,83
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	Natrit	286,14	1,45	197,34
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	Mirabilit	322,19	1,46	220,08
α'-2CaO·SiO ₂ , α'-C ₂ S	Bredigit	172,24	3,40	50,66
β-2CaO·SiO ₂ , β-C ₂ S	Larnit	172,24	3,28	52,51
γ-2CaO·SiO ₂ , γ-C ₂ S	Shannonit	172,24	2,97	57,99
CaO·SiO ₂ , CS	Wollastonit	116,16	2,78 - 2,91	40,83
3CaO·Al ₂ O ₃ , C ₃ A	Aluminat	270,20	3,04	88,88
2CaO(Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃), C ₂ (A,F)	Brownmillerit	485,97	3,76	129,25
CaO·Al ₂ O ₃ , CA	Monocalciumaluminat	158,04	2,95	53,66
12CaO·7Al ₂ O ₃ , C ₁₂ A ₇	Calciumaluminat	1386,68	2,72	513,59
CaO·Al ₂ O ₃ ·10H ₂ O, CAH ₁₀	Dekahydrat	338,19	1,73	195,49
2CaO·Al ₂ O ₃ ·8H ₂ O, C ₂ AH ₈	Calciumaluminat-hydrat	358,24	1,95	183,71
3CaO·Al ₂ O ₃ ·6H ₂ O, C ₃ AH ₆	Hexahydrat	378,29	2,522	150,00
4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O, C ₄ AH ₁₃	Calciumaluminat-hydrat	560,48	2,05	273,94
3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaCl ₂ ·10H ₂ O	α-Friedel'sches Salz	561,34	2,07	271,83
3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaCl ₂ ·10H ₂ O	β-Friedel'sches Salz	561,34	2,09	268,58
3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·12H ₂ O	Monosulfat	622,53	2,03	306,66
3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O	Ettringit	1255,12	1,78	707,11
CaO·SiO ₂ ·CaSO ₄ ·CaCO ₃ ·14,5H ₂ O	Thaumasit	622,63	1,89	330,13

Tabelle A5: Tabellarische Übersicht der historischen Putzproben. Die genaue Lage der Probenahmestellen sind den nachfolgenden Bildern A1 bis A4 zu entnehmen. In Klammern die Probenbezeichnung in dieser Arbeit

Probebezeichnung	Beschreibung der Proben
Torhalle in Lorsch Bohrkerne	Tiefe entspricht der Höhe des Bohrkernes
E5.4.5-0010 (PL1)	Nordwand; Ergänzungsmörtel, Wandfläche, Probemenge 23,5 g, Tiefe 25 mm
E5.4.7-0010 (PL2)	Nordwand; Ergänzungsmörtel, Wandfläche mit glatter Oberfläche, Probemenge 22,3 g, Tiefe ca. 17 mm
F6.4.7-0010 (PL3)	Nordwand; karolingischer Putz mit Resten gotischer Schlämme, Probemenge 17,1 g, Tiefe ca. 20 mm
F6.4.7-0011 (PL4)	Nordwand; karolingischer Putz mit originaler Oberfläche, Probemenge 18,9 g, Tiefe ca. 22 mm
E5.4.7-0011 (PL5)	Nordwand; Ergänzungsputz, Wandfläche mit glatter Oberfläche, Probemenge 16,9 g, Tiefe ca. 20 mm
E5.4.7-0012 (PL6)	Nordwand; Ergänzungsputz, Wandfläche mit glatter Oberfläche, Probemenge 40,6 g, Tiefe ca. 35 mm
B2.6.7-0010 (PL7)	Ostwand; Ergänzungsputz aus größerer Ausbesserung, feinkörnige Oberfläche, Probemenge 18,7 g, Tiefe ca. 20 mm
B2.6.7-0011 (PL8)	Ostwand; Ergänzungsputz aus größerer Ausbesserung, feinkörnige Oberfläche, Probemenge 23,2 g, Tiefe ca. 19 mm
B2.6.7-0013 (PL9)	Ostwand; Ergänzungsputz aus größerer Ausbesserung, feinkörnige Oberfläche, Probemenge 21,7 g, Tiefe ca. 18 mm
B2.4.9-0011 (PL10)	Nordwand; gotischer Putz, Probemenge 13,2 g, Tiefe ca. 11 mm
B2.4.9-0012 (PL11)	Nordwand; gotischer Putz, Bohrkern zerbröckelt, Oberfläche mit ca. 10 mm Putz erhalten, Probemenge 8,9 g, Tiefe 11 mm
C3.4.9-0010 (PL12)	Nordwand; gotischer Putz, Bohrkern in 3 Teile zerbrochen, Probemenge 25,6 g, Tiefe ca. 9 mm
B2.2.7-0017 (PL13)	Westwand; gotischer Putz mit Oberfläche, Probemenge 17,7 g, Tiefe ca. 10-13 mm
B2.2.7-0018 (PL14)	Westwand; gotischer Putz mit Oberfläche, Probemenge 13,3 g, Tiefe ca. 11 mm
B2.2.7-0019 (PL15)	Westwand; gotischer Mörtel mit Oberfläche, Probemenge 14,6 g, Tiefe ca. 10 mm
A1.2.7-0013 (PL16)	Westwand; Ergänzungsmörtel aus der Hacklochfüllung im Bereich von gotischem Mörtel, Probemenge 13,9 g, Tiefe ca. 9 mm
A1.2.7-0014 (PL17)	Westwand; Ergänzungsmörtel aus der Hacklochfüllung im Bereich von gotischem Mörtel, Probemenge 18,9 g, Tiefe ca. 17 mm
A1.2.7-0015 (PL18)	Westwand; Ergänzungsmörtel aus der Hacklochfüllung im Bereich von gotischem Mörtel, Probemenge 9,5 g, Tiefe ca. 6 mm
B2.3.8-0010 (PL19)	Südwand; gotischer Putz mit Oberfläche, Probemenge 18,1 g, Tiefe ca. 12-19 mm
B2.3.8-0011 (PL20)	Südwand; gotischer Putz mit Oberfläche, Probemenge 23,2 g, Tiefe ca. 15-20 mm
B2.3.8-0012 (PL21)	Südwand; gotischer Putz mit Oberfläche, Probemenge 22,4 g, Tiefe ca. 14-22 mm
A1.6.5-0013 (PL22)	Ostwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich von karolingischem Putz, Probemenge 16,6 g, Tiefe ca. 17 mm
B2.6.5-0012 (PL23)	Ostwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich von karolingischem Putz, Probemenge 18,8 g, Tiefe ca. 16 mm
G7.3.5-0010 (PL24)	Südwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich von karolingischem Putz. Der Ergänzungsputz war nur 5 mm dick, darunter lag eine Mörtelschicht mit Oberfläche, Probemenge 22,3 g, Tiefe ca. 22 mm
G7.3.5-0011 (PL25)	Südwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich von karolingischem Putz, Probemenge 25,3 g, Tiefe ca. 25 mm
A1.3.5-0010 (PL26)	Südwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich von karolingischem Putz, Probemenge 9,4 g, Tiefe ca. 6 mm
A.1.3.5-0011 (P27)	Südwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich von karolingischem Putz, Probemenge 21,3 g, Tiefe ca. 25 mm

Fortsetzung Tabelle A5: Tabellarische Übersicht der historischen Putzproben. Die genaue Lage der Probenahmestellen sind den nachfolgenden Bildern A1 bis A4 zu entnehmen. In Klammern die Probenbezeichnung in dieser Arbeit

Probebezeichnung	Beschreibung der Proben
nicht gebohrte Proben, ca. 100 g Torhalle in Lorsch	Tiefe entspricht der Höhe des Bohrkernes
C3.4.8-0010 (PL28)	Nordwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz, Probemenge 121,3 g, Tiefe 3-25 mm
B2.4.8-0011 (PL29)	Nordwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz, die Probe wurde entlang eines weit hervorstehenden Mauersteines genommen, Probemenge 95,3 g, Tiefe 3-20 mm
B2.4.9-0010 (PL30)	Nordwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz, Probemenge 98,7 g, Tiefe 3-25 mm
D4.6.7-0010 (PL31)	Ostwand; karolingischer Mörtel unter Ergänzungsputz, Probemenge 135,5 g, Tiefe 5-25 mm
E5.5.6-0010 (PL32)	Ostwand; karolingischer Mörtel unter Ergänzungsputz. Die Entnahmestelle geht bis auf den Putzuntergrund bzw. Unterputz; Unterputz wurde nicht entnommen. Probemenge 105,4 g, Tiefe 5-25 mm
A1.6.5-0010 (PL33)	Ostwand; karolingischer Mörtel unter Ergänzungsputz. Die Entnahmestelle geht bis auf den Putzuntergrund bzw. Unterputz; Unterputz wurde nicht entnommen. Probemenge 95,1 g, Tiefe 5-15 mm
B2.6.5-0010 (PL34) B2.6.5-0011	Ostwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich karolingischer Putze. Der Putz reicht bis auf karolingischen Putz, der nicht entnommen wurde. Probemenge 92,6 g, Tiefe 0-15 mm
D4.6.6-0010 (PL35) D4.6.6-0011 D4.6.6-0012	Ostwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich karolingischer Putze. Der Putz reicht bis auf karolingischen Putz, der nicht entnommen wurde. Die Probe setzt sich aus 5 kleineren, flachen und 2 größeren, tieferen Hacklochfüllungen zusammen, Probemenge 92,1 g, Tiefe 3-13 mm
C3.5.5-0010 (PL36) C3.5.5-0011 C3.5.5-0012	Ostwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich karolingischer Putze. Die Probe setzt sich aus 3 Hacklochfüllungen zusammen. Probemenge 103,9 g, Tiefe 5-15 mm
E.5.5.5-0010 (PL37) E5.5.6-0010 F6.5.6-0010 F6.5.6-0011 F6.5.6-0012 F6.5.6-0013	Ostwand; Ergänzungsputz aus Hacklochfüllung im Bereich karolingischer Putze, der Putz reicht bis auf karolingischen Putz, der nicht entnommen wurde. Die Probe setzt sich aus 6 kleineren, flachen Hacklochfüllungen zusammen. Probemenge 98,3 g, Tiefe 3-15 mm
E5.3.9-0010 (PL38)	Südwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz, Probemenge 105,5 g, Tiefe 12 mm
F6.3.8-0011 (PL39)	Südwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz, Probemenge 123,3 g, Tiefe 22 mm
F6.3.8-0012 (PL40)	Südwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz, Probemenge 94,3 g, Tiefe 19 mm
B2.2.6-0010 (PL41)	Westwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz; Entnahme bis auf den Unterputz, der nicht entfernt wurde. Probemenge 111,1 g, Tiefe 3-15 mm
B2.2.6-0011 (PL42) B2.2.6-0012	Westwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz an 2 nebeneinander liegenden Stellen; Entnahme bis auf den Unterputz, der nicht entfernt wurde. Probemenge 189,4 g, Tiefe 3-10 mm
C3.1.6-0013 (PL43)	Westwand; gotischer Putz unter Ergänzungsputz; Entnahme bis auf den Unterputz, der nicht entfernt wurde, Probemenge 97,8 g, Tiefe 3-10 mm

Fortsetzung Tabelle A5: Tabellarische Übersicht der historischen Putzproben. Die genaue Lage der Probenahmestellen sind den nachfolgenden Bildern A4 bis A6 zu entnehmen. In Klammern die Probenbezeichnung in dieser Arbeit

Probebezeichnung	Beschreibung der Proben
Kratzproben ca. 3 g Torhalle in Lorsch	Tiefe entspricht der Höhe des Bohrkernes
B2.2.7-0014 (PL44a)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 5,8 g, Tiefe 0-6 mm
B2.2.7-0014 (PL44b)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 2,1 g, Tiefe 7-11 mm
B2.2.7-0015 (PL45a)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 3,3 g, Tiefe 0-6 mm
B2.2.7-0015 (PL45b)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 3,7 g, Tiefe 7-14 mm
B2.2.7-0016 (PL46a)	Westwand; gotischer Putz, Probemenge 2,9 g, Tiefe 0-6 mm
B2.2.7-0016 (PL46b)	Westwand; gotischer Putz, Probemenge 5,1 g, Tiefe 7-14 mm
C3.1.7-0010 (PL47a)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 5,8 g, Tiefe 0-6 mm
C3.1.7-0010 (PL47b)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 8,9 g, Tiefe 7-20 mm
C3.1.7-0011 (PL48a)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 3,4 g, Tiefe 0-6 mm
C3.1.7-0011 (PL48b)	Westwand; Ergänzungsputz, Probemenge 2,7 g, Tiefe 7-11 mm
C3.2.7-0012 (PL49a)	Westwand; gotischer Putz, Probemenge 3,8 g, Tiefe 0-6 mm
C3.2.7-0012 (PL49b)	Westwand; gotischer Putz, Probemenge 2,2 g, Tiefe 7-13 mm
Kalkputze Einhardbasilika in Steinbach	Tiefe entspricht der Höhe des Bohrkernes
10-01.1/0010 (PS1)	Ostwand Ecke Nord; in ca. 40 cm Höhe, Probemenge 99,1 g und 15,29 g (Bohrkern, getrocknet)
10-01.1/0010 (PS2)	Ostwand Ecke Nord, in ca. 40 cm Höhe, Probemenge 46,4 g
K N8.1/0011 (PS3)	Nordwand Ecke Ost, Probemenge 119,4 g und 17,55 g (Bohrkern, getrocknet)
(PS4)	„Verputzstücke vermutlich von der Innenwand des „...“ aus dem Bereich des Westbogens, auf dem Boden des „...“ nach Abfahrt der Restauratoren“*, Probemenge 379,1 g und 10,36 g (Bohrkern, getrocknet, aus der Probe im Labor gebohrt)
Bohrkerne Einhardbasilika in Steinbach	Tiefe entspricht der Höhe des Bohrkernes
K - N 2.2 / 0012 (PS5)	Nordwand; karolingischer Kalkputz, Probemenge 15,4 g (Bohrkern getrocknet)
K - N 2.2 / 0013 (PS6)	Nordwand; karolingischer Kalkputz, Probemenge 11,2 g (Bohrkern getrocknet)
6.1/6.2 K/J / N 1.2 / 0010 (PS7)	Nordwand; karolingischer Kalkputz, Probemenge 15,1 g (Bohrkern getrocknet)
K - N 2.2 / 0012 (PS8)	Nordwand; karolingischer Kalkputz, Probemenge 13,2 g (Bohrkern getrocknet)
K - N 2.2 / 0012 (PS9)	Nordwand; karolingischer Kalkputz, Probemenge 11,5 g (Bohrkern getrocknet)
K - N 2.2 / 0011 (PS10)	Nordwand; karolingischer Kalkputz, Probemenge 9,8 g (Bohrkern getrocknet)

* Diese Notiz lag der Probe im Lapidarium bei. Mit „...“ gekennzeichnete Satzteile sind, sind nicht lesbar.

Fortsetzung Tabelle A5: Tabellarische Übersicht der historischen Putzproben. Die genaue Lage der Probenahmestellen sind den nachfolgenden Bildern A8 bis A9 zu entnehmen. In Klammern die Probenbezeichnung in dieser Arbeit

Probebezeichnung	Beschreibung der Proben
Putzproben Magdeburger Dom	Tiefe entspricht der Höhe des Bohrkernes
P 1 (PM1)	Ostflügel, Westseite; Reparaturmörtel 1, Probemenge 91,5 g, Tiefe 18 mm
P 2 (PM2)	Ostflügel, Westseite; Reparaturmörtel 1, Probemenge 35,7 g, Tiefe 15 mm
Md 2.1 (PM3)	Ostflügel, Westseite; historischer Mörtel, Probemenge 58,9 g, Tiefe 8 mm
P 3 (PM4)	Ostflügel, Westseite; Kalk/Zement-Reparaturmörtel, Probemenge 17,8 g, Tiefe 6 mm
P 4 (PM5)	Ostflügel, Westseite; Kalk/Zement-Reparaturmörtel, Probemenge 535,6 g, Tiefe 15 mm
P 5 (PM6)	Ostflügel, Westseite; Reparaturmörtel 2, Probemenge 43,1 g, Tiefe 15 mm
P 6 (PM7)	Ostflügel, Westseite; historischer Fugenmörtel, Probemenge 91,7 g, Tiefe 15 mm
P 7 (PM8)	Ostflügel, Westseite; historischer Fugenmörtel, Probemenge 45,2 g, Tiefe 15 mm
P 8 (PM9)	Ostflügel, Westseite; historischer Fugenmörtel, Probemenge 9,8 g, Tiefe 15 mm
P 9 (PM10)	Ostflügel, Westseite; Reparaturmörtel 1, Probemenge 2,3 g, Tiefe 15 mm
P 10 (PM11)	Ostflügel, Westseite; Reparaturmörtel 2, Probemenge 33,6 g, Tiefe 15 mm
P 11 (PM12)	Ostflügel, Westseite; historischer Putz unter Reparaturmörtel, Probemenge 17,3 g, Tiefe 15 mm
Putzproben ehemaliges Zisterzienserkloster Heydau	Tiefe entspricht der Höhe des Bohrkernes
H1 (PH1)	Südseite; historischer Putz, Probemenge 101,6 g, Tiefe 20 mm
H2 (PH2)	Südseite; historischer Putz, Probemenge 120,8 g, Tiefe 15 mm
H3 (PH3)	Südseite; historischer Putz, Probemenge 138,9 g, Tiefe 18 mm
H4 (PH4)	Südseite; historischer Putz, Probemenge 98,1 g, Tiefe 13 mm

Tabelle A6: Vergleich der Wasseraufnahmegrade nach DIN 52103 Verfahren A¹²¹ (w_{mA}) und nach 24 stündiger Lagerung im Vakuum bei 50hPa (w_{mV}) am Beispiel einiger historischer Putzmörtel

Probe	w_{mA} / M.-%	w_{mV} / M.-%
PL3	17,5	25,6
PL6	13,9	22,3
PS1	21,5	23,1
PS2	19,5	20,4
PS3	19,0	20,0
PS4	19,6	23,9

¹²¹ DIN 52103: Verfahren A beschreibt die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

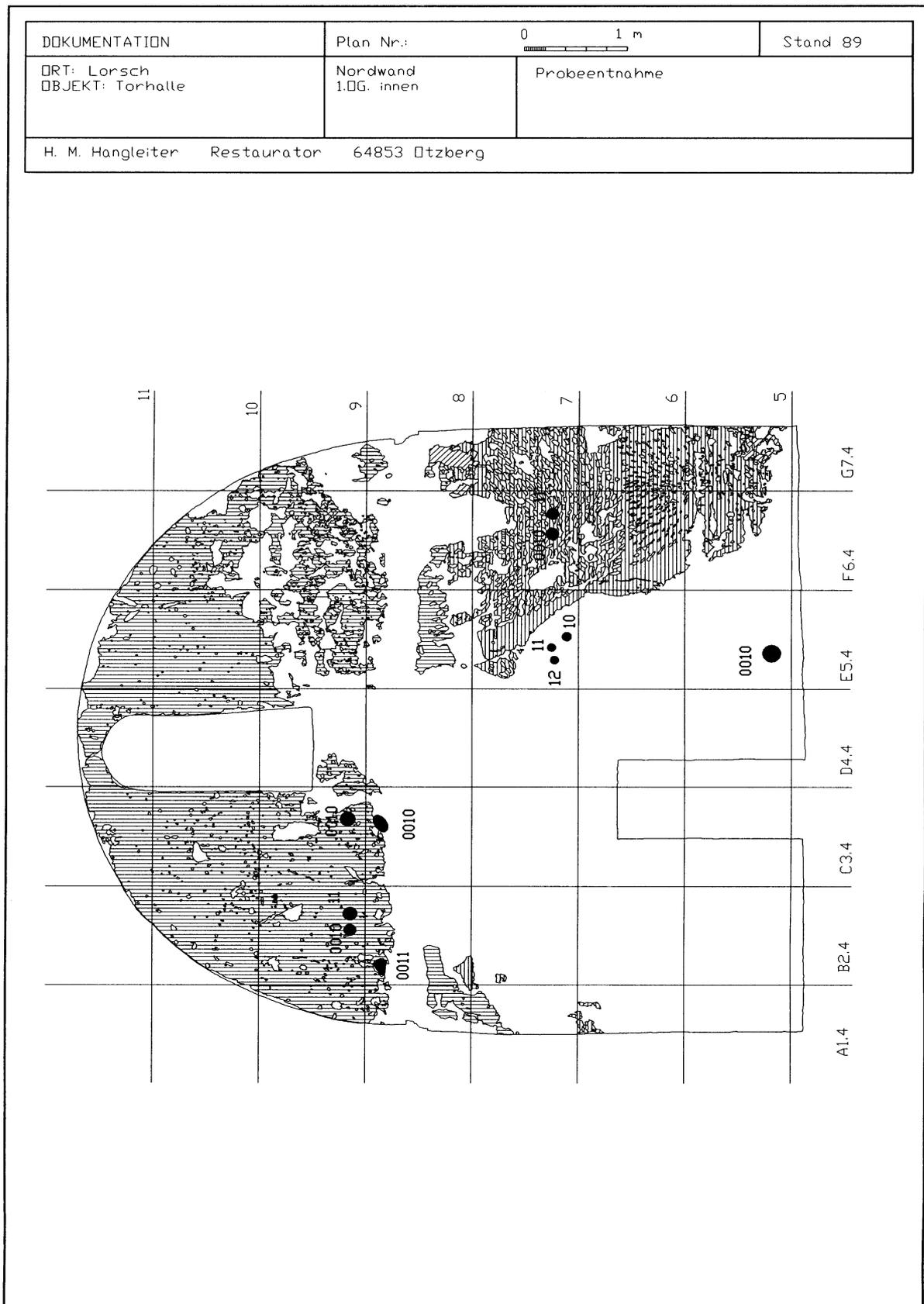


Bild A1: Lage der Probenahmestellen an der Nordwand der Torhalle in Lorsch

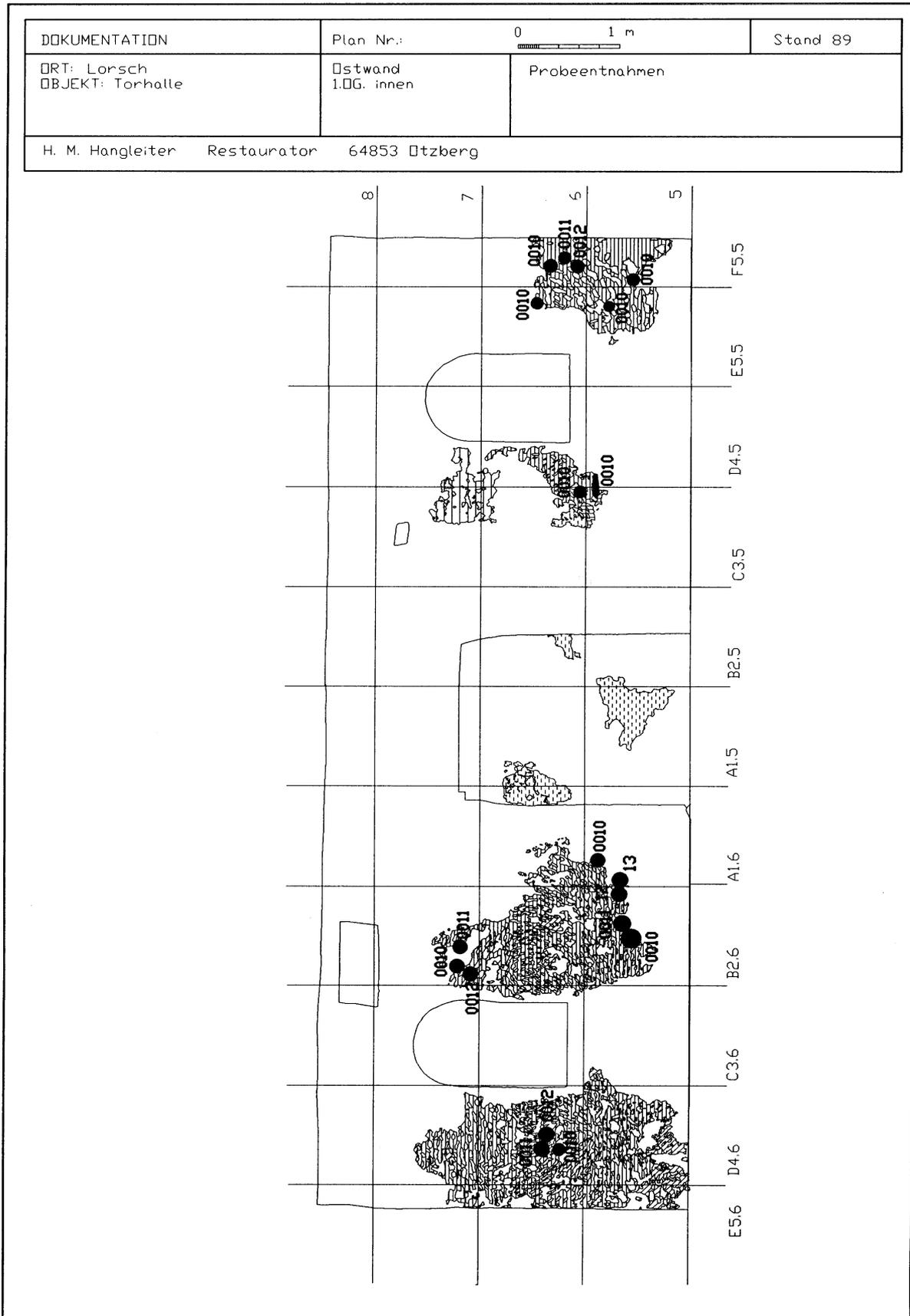


Bild A2: Lage der Probenahmestellen an der Ostwand der Torhalle in Lorsch

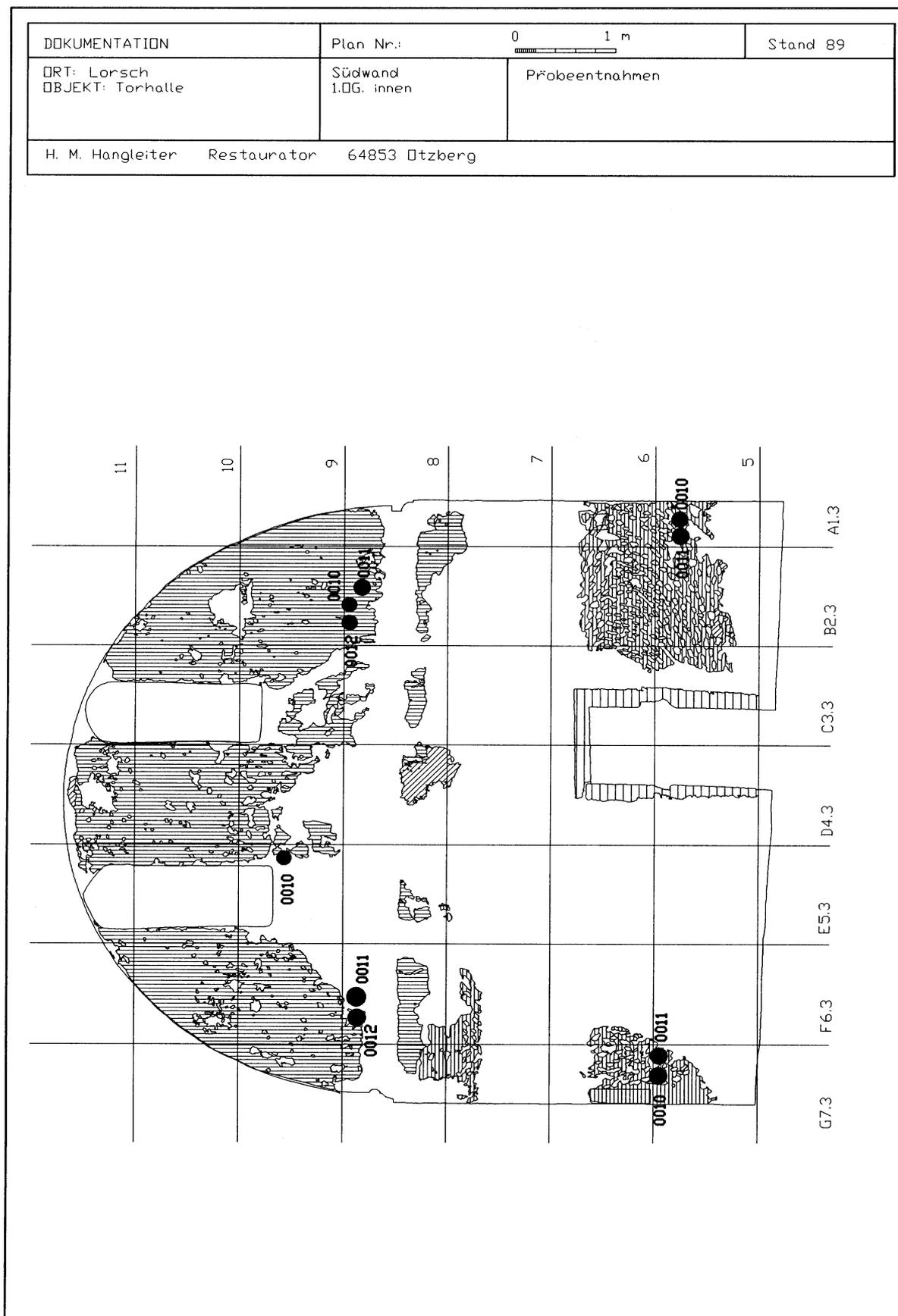


Bild A3: Lage der Probenahmestellen an der Südwand der Torhalle in Lorsch

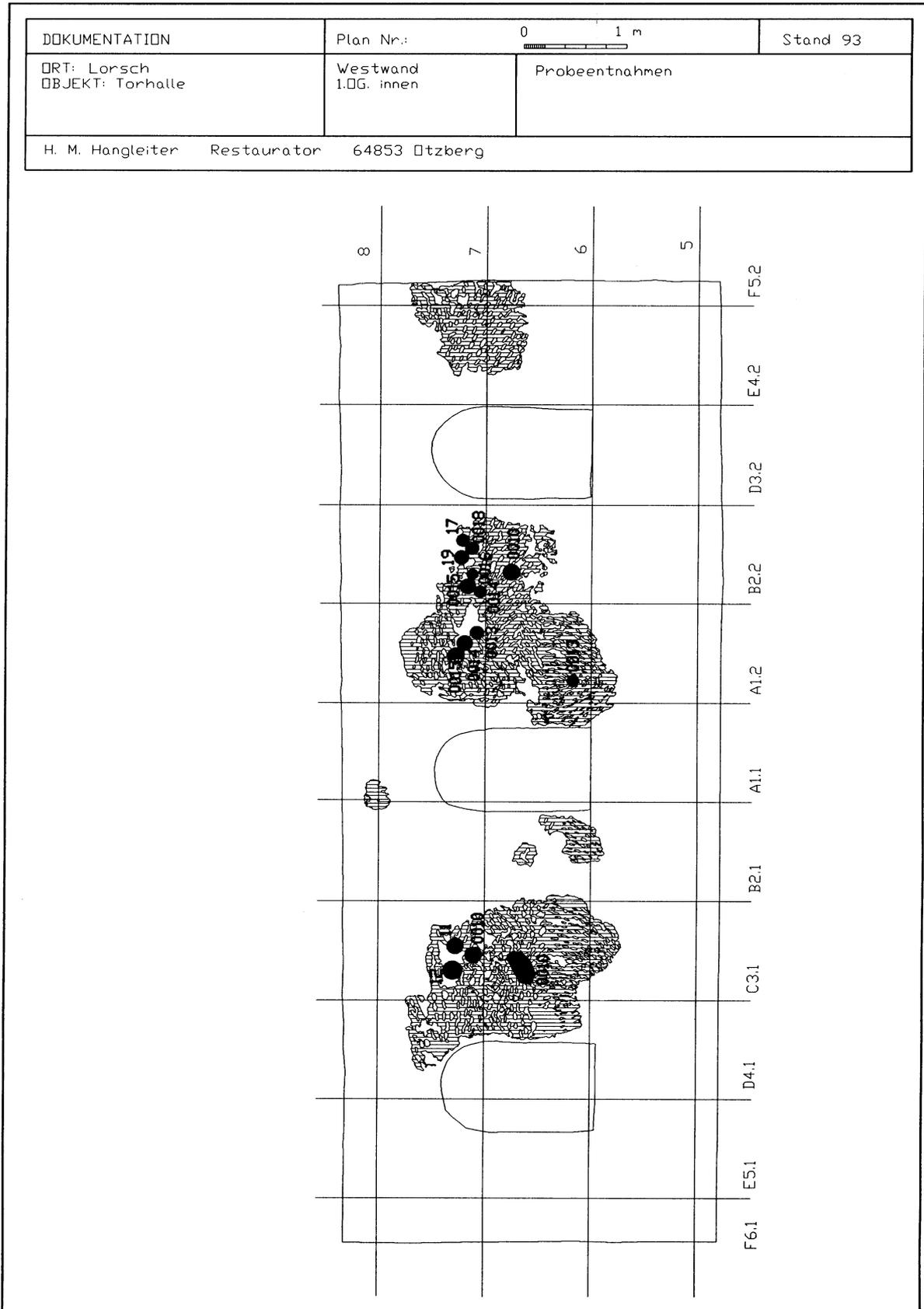


Bild A4: Lage der Probenahmestellen an der Westwand der Torhalle in Lorsch

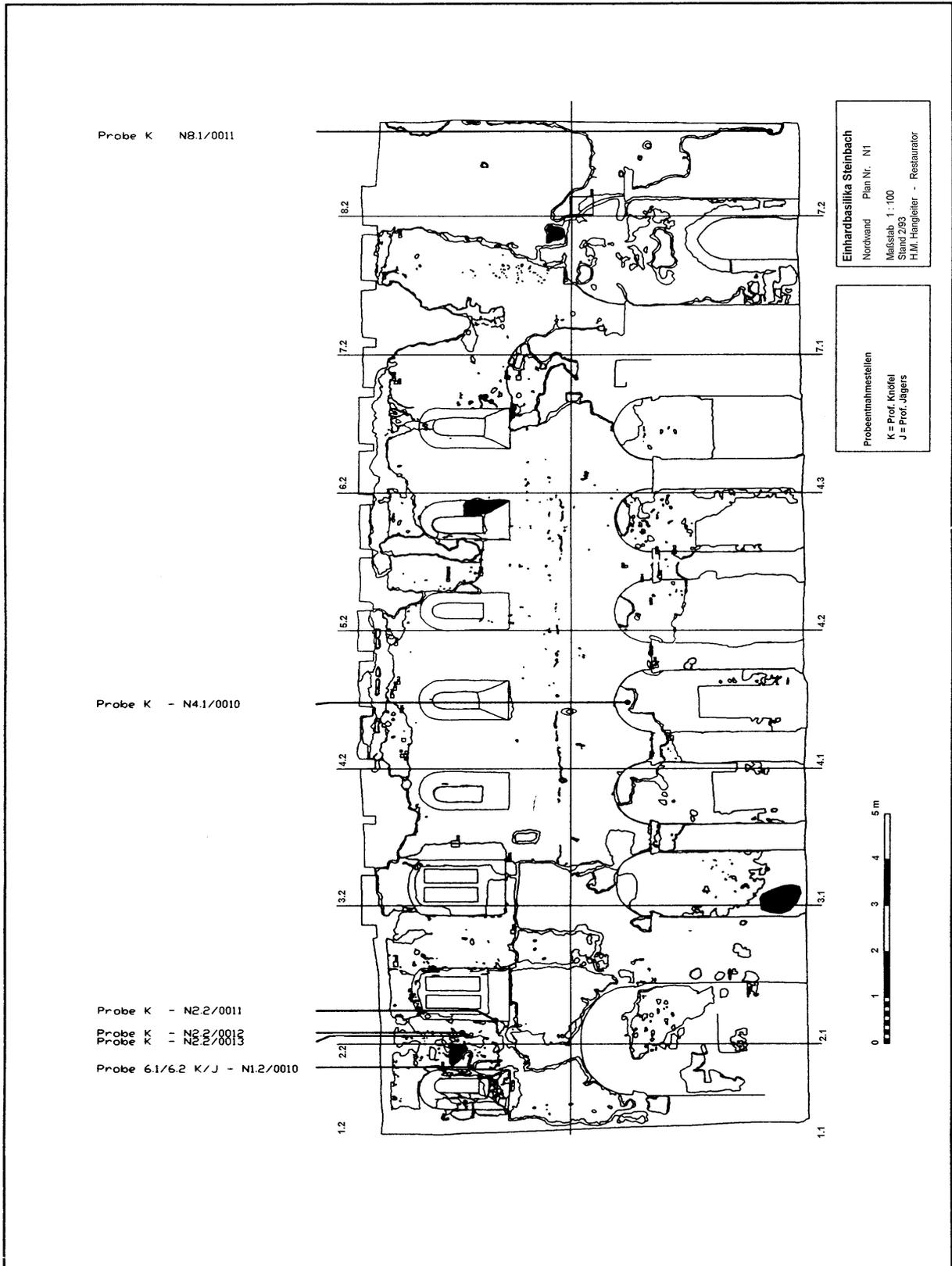


Bild A5: Lage der Probenahmestellen an der Nordwand der Einhardbasilika in Steinbach

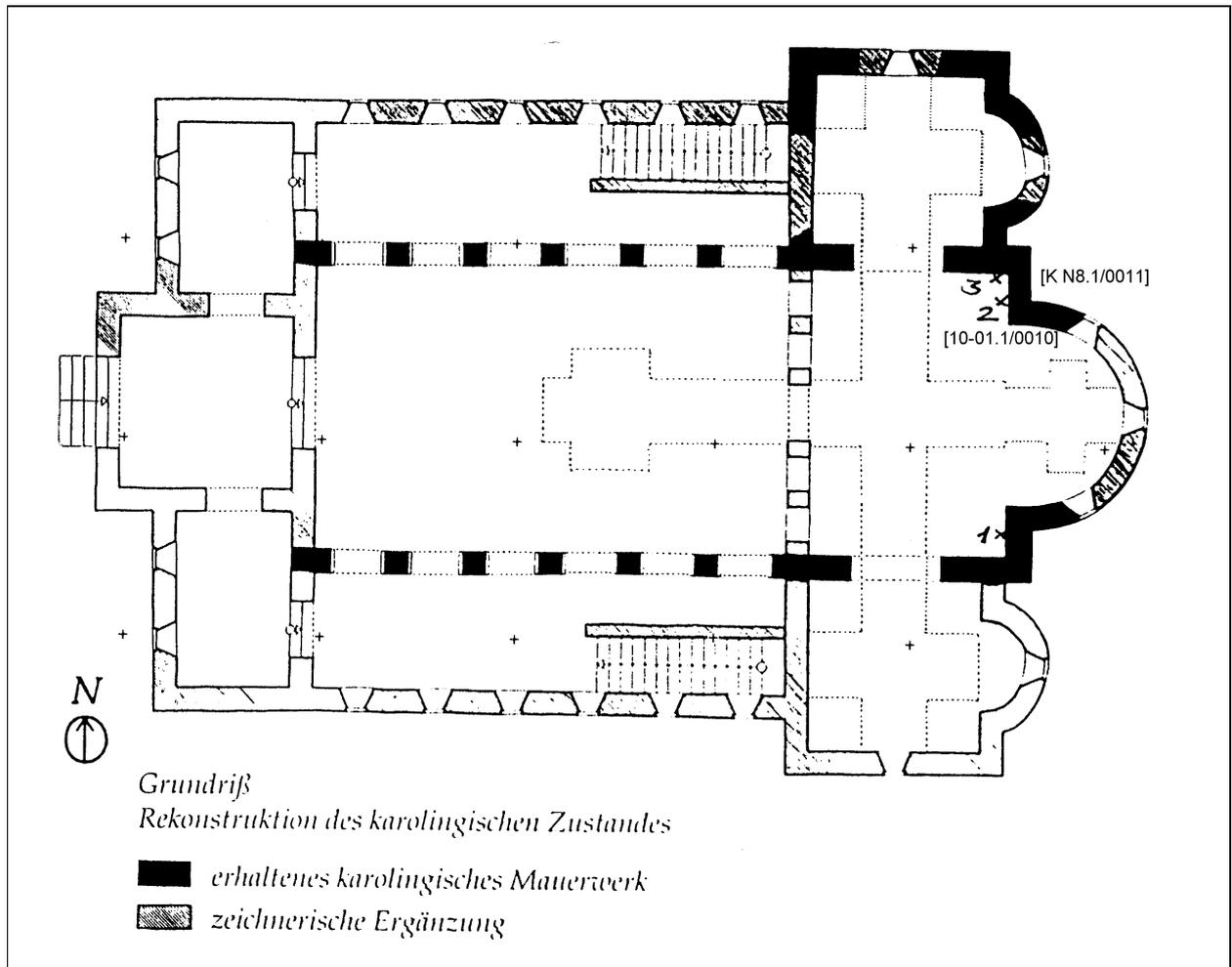


Bild A6: Lage der Probenahmestellen an der Nord- und Ostwand der Einhardbasilika in Steinbach

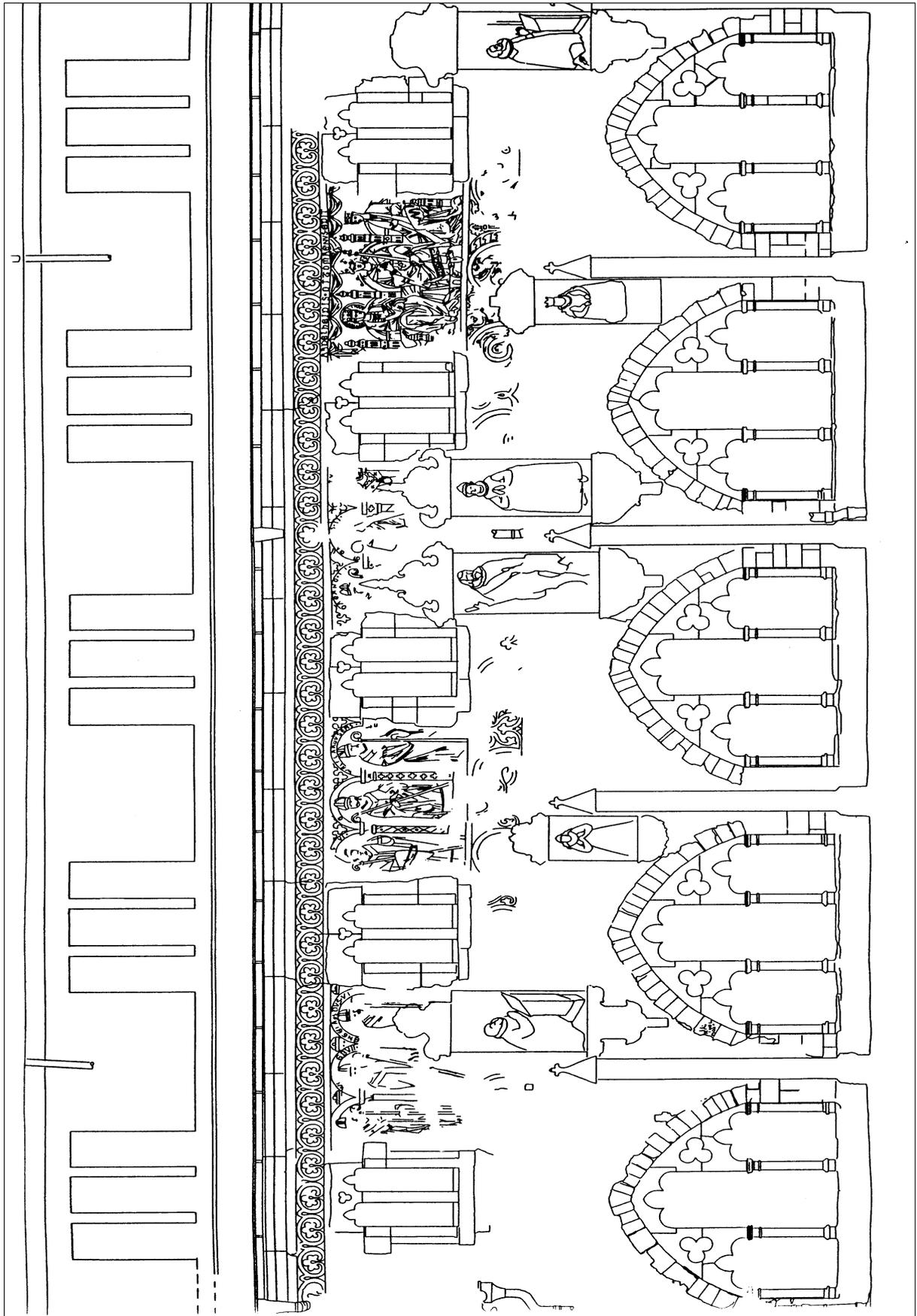


Bild A7: Ansicht der Westwand des Ostflügels des Kreuzganges des Magdeburger Domes

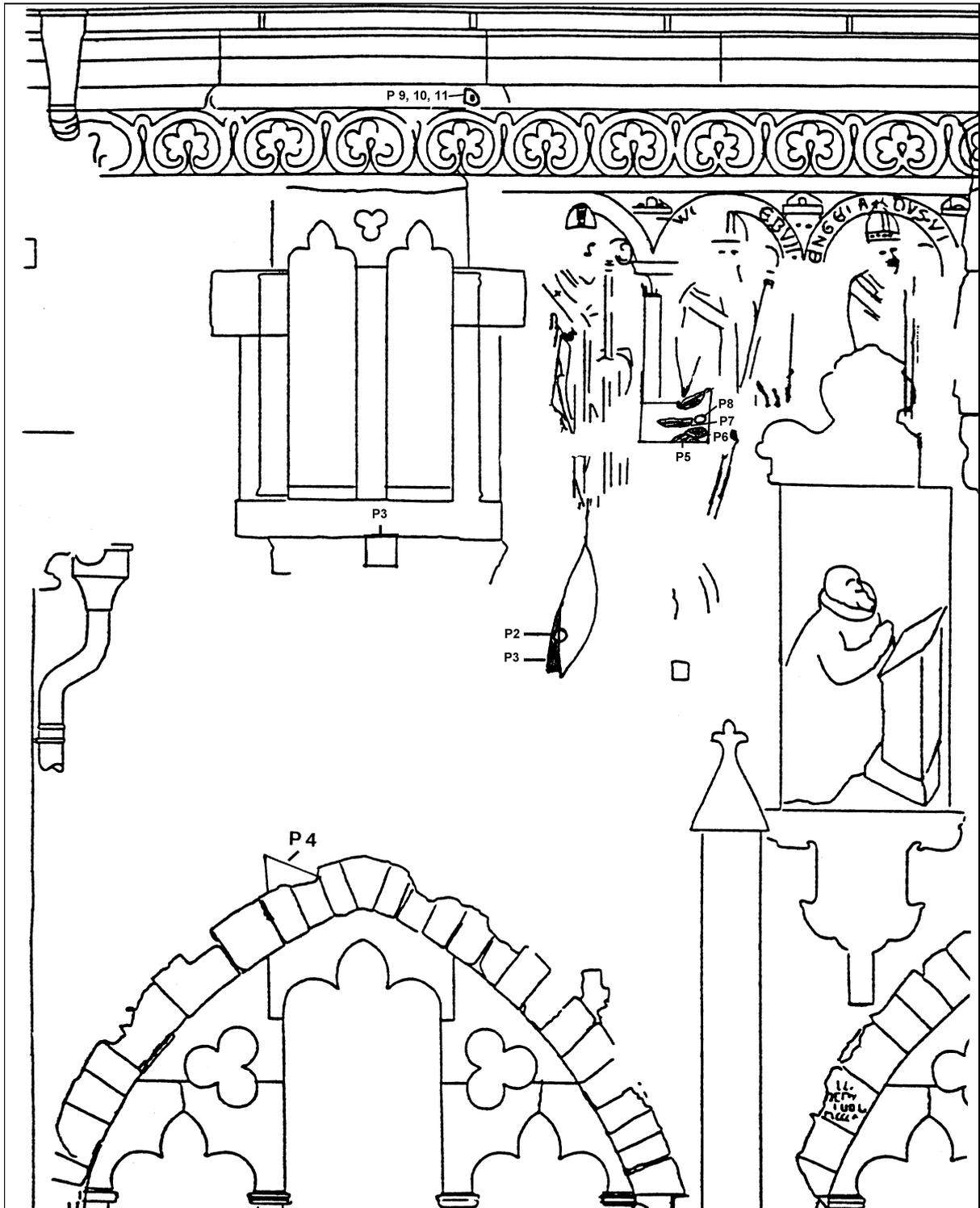


Bild A8: Lage der Probenahmestellen an der Westwand des Ostflügels des Kreuzganges des Magdeburger Domes

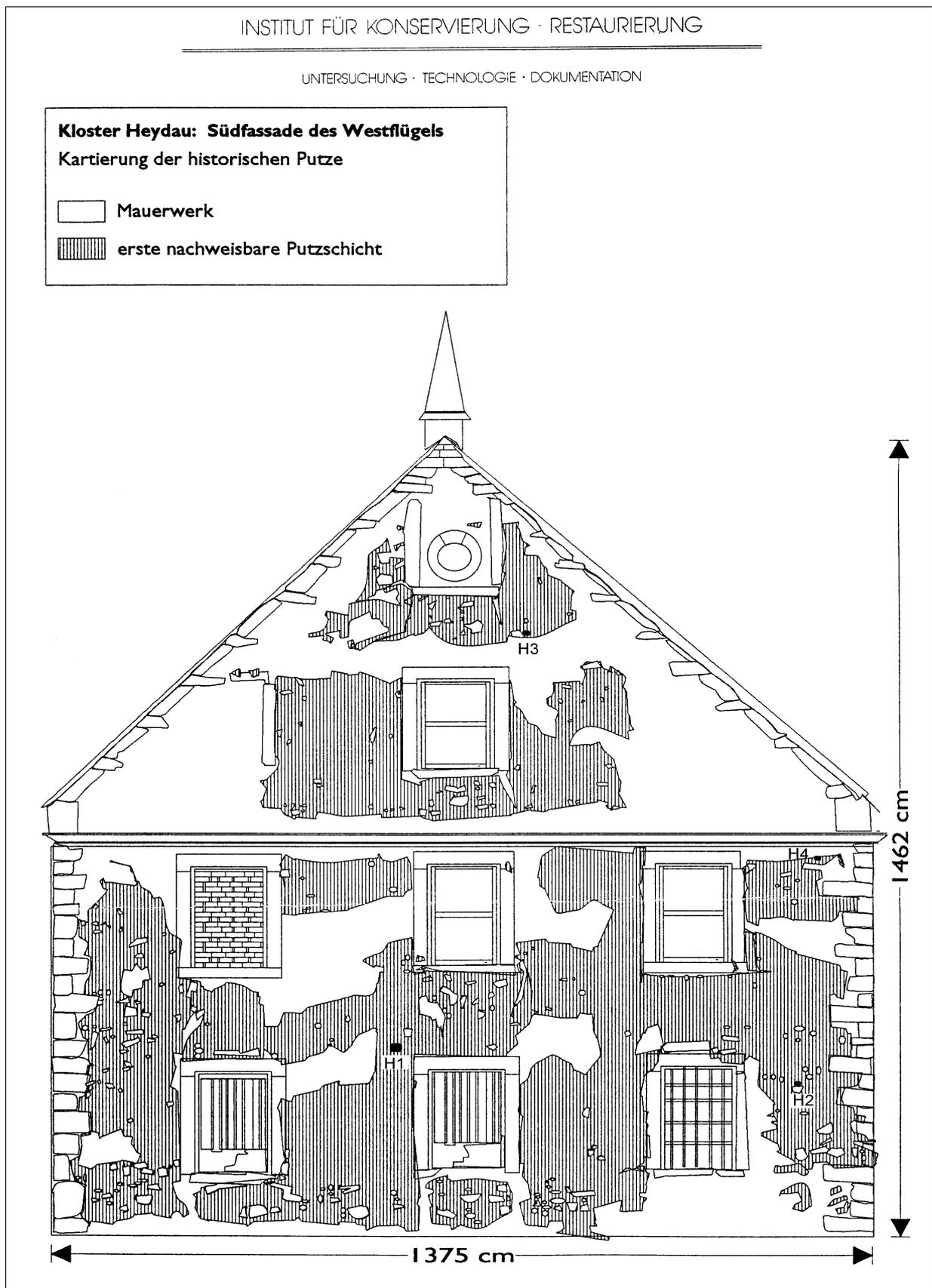


Bild A9: Lage der Probenahmestellen Südwand des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau in Morschen

Tabelle A7: Bindemittelgehalt als CaCO_3 (CaCO_3) und HCl-lösliches SiO_2 (lösli. SiO_2), Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bezogen auf CaCO_3 als Bindemittel ($\text{B}/\text{Z}_{\text{CaCO}_3}$), auf $\text{Ca}(\text{OH})_2$ als Bindemittel ($\text{B}/\text{Z}_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$) und auf CaO als Bindemittel ($\text{B}/\text{Z}_{\text{CaO}}$) der historischen Mörtel. (GT = Gewichtsteile)

Probe	CaCO_3 / M.-%	lösli. SiO_2 / M.-%	Zuschlag / M.-%	$\text{B}/\text{Z}_{\text{CaCO}_3}$ / GT	$\text{B}/\text{Z}_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ / GT	$\text{B}/\text{Z}_{\text{CaO}}$ / GT
PL28	24,5	1,1	74,5	1:2,9	1:3,9	1:5,0
PL29	25,2	2,4	72,4	1:2,6	1:3,5	1:4,4
PL30	27,2	1,1	71,7	1:2,5	1:3,4	1:4,4
PL31	30,7	1,2	68,1	1:2,1	1:2,9	1:3,7
PL32	35,4	0,8	63,8	1:1,8	1:2,4	1:3,1
PL33	24,2	0,9	74,9	1:3,0	1:4,0	1:5,2
PL34	23,0	1,2	75,8	1:3,1	1:4,2	1:5,4
PL35	35,6	1,3	63,1	1:1,7	1:2,3	1:3,0
PL36	22,5	1,0	76,5	1:3,3	1:4,4	1:5,6
PL37	23,3	1,1	75,6	1:3,1	1:4,2	1:5,3
PL38	28,6	1,2	70,2	1:2,4	1:3,2	1:4,1
PL39	28,0	1,5	70,5	1:2,4	1:3,2	1:4,1
PL40	26,9	1,3	71,8	1:2,6	1:3,4	1:4,4
PL41	23,8	1,1	75,1	1:3,0	1:4,1	1:5,2
PL42	23,8	1,2	75,0	1:3,0	1:4,1	1:5,2
PL43	24,7	1,2	74,1	1:2,9	1:3,9	1:4,9
PS1	43,5	3,4	53,1	1:1,1	1:1,5	1:1,9
PS2	44,0	3,1	52,9	1:1,1	1:1,5	1:1,9
PS3	45,5	3,1	51,5	1:1,1	1:1,4	1:1,8
PS4	37,9	2,1	60,0	1:1,5	1:2,0	1:2,6
PM1	19,0	3,7	77,3	1:3,4	1:4,4	1:5,4
PM2	18,5	2,0	79,5	1:3,9	1:5,1	1:6,4
PM3	39,4	6,1	54,5	1:1,2	1:1,5	1:1,9
PM5	31,8	3,9	64,3	1:1,8	1:2,3	1:3,0
PM6	14,9	1,7	83,4	1:5,0	1:6,6	1:8,3
PM7	29,0	1,6	69,4	1:2,3	1:3,0	1:3,9
PM8	29,4	2,4	68,2	1:2,1	1:2,8	1:3,6
PM9	48,0	10,8	41,2	1:0,7	1:0,9	1:1,1
PM11	22,7	3,8	73,5	1:2,8	1:3,6	1:4,4
PM12	19,9	2,7	77,4	1:3,4	1:4,4	1:5,6
PH1	52,1	1,7	44,8	1:0,8	1:1,1	1:1,5
PH2	45,6	2,6	49,7	1:1,0	1:1,4	1:1,8
PH3	48,8	7,7	37,4	1:0,7	1:0,9	1:1,1
PH4	48,6	4,2	44,0	1:0,8	1:1,1	1:1,4

Tabelle A8: Korngrößenverteilung des Zuschlags der historischen Putze und deren Körnungsziffern (k' -Wert). Auf den einzelnen Sieben sind die Rückstandsfraktionen der Zuschläge angegeben

Probe	<0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	k' - Wert
	mm								
	/ M.-%								
PL28	1,2	6,8	38,1	41,7	9,1	2,8	0,3	0,0	2,60
PL29	1,6	7,6	40,9	40,7	7,6	1,5	0,1	0,0	2,50
PL30	1,3	7,2	38,8	41,2	9,1	2,2	0,2	0,0	2,57
PL31	1,0	5,6	36,8	47,8	7,6	1,0	0,2	0,0	2,59
PL32	2,2	7,0	36,6	45,2	7,3	1,3	0,4	0,0	2,54
PL33	1,1	5,8	35,4	48,4	8,0	1,2	0,1	0,0	2,60
PL34	0,9	4,8	40,1	45,2	7,7	1,2	0,1	0,0	2,58
PL35	1,0	4,9	38,9	45,2	8,4	1,4	0,2	0,0	2,60
PL36	0,9	4,7	40,2	45,8	7,3	1,1	0,0	0,0	2,57
PL37	0,9	4,5	37,5	45,6	8,6	1,5	1,4	0,0	2,67
PL38	1,4	7,7	42,5	40,3	6,6	1,3	0,2	0,0	2,48
PL39	1,3	8,3	42,9	39,8	6,4	1,2	0,1	0,0	2,46
PL40	1,8	8,0	42,7	39,6	6,4	1,4	0,1	0,0	2,45
PL41	0,9	5,1	28,6	48,1	14,3	2,9	0,1	0,0	2,79
PL42	0,9	5,1	28,1	47,9	14,7	3,2	0,1	0,0	2,80
PL43	1,2	5,6	30,7	47,5	12,4	2,6	0,0	0,0	2,72
PS1	12,7	11,6	27,2	28,8	16,8	2,3	0,6	0,0	2,35
PS2	10,9	10,4	25,7	27,6	14,8	2,9	2,6	5,1	2,70
PS3	13,4	12,8	28,5	27,2	15,2	2,5	0,4	0,0	2,27
PS4	14,6	9,6	28,5	27,9	15,9	3,0	0,5	0,0	2,32
PM1	2,0	2,3	18,0	46,4	22,3	8,2	0,8	0,0	3,13
PM2	0,9	2,0	18,7	46,9	22,5	7,1	1,9	0,0	3,17
PM3	1,9	3,3	5,2	21,0	39,6	24,2	4,8	0,0	3,85
PM5	5,7	2,9	11,9	46,1	23,0	8,2	2,2	0,0	3,11
PM6	0,2	0,2	8,1	44,4	28,9	14,7	3,5	0,0	3,60
PM7	3,0	1,1	4,6	20,5	37,4	19,3	10,3	3,8	4,06
PM8	4,1	1,5	6,2	17,2	32,6	19,6	11,8	7,0	4,14
PM9	4,6	1,8	5,6	23,2	39,0	20,8	5,0	0,0	3,73
PM11	0,7	1,5	19,4	43,9	23,1	7,9	2,8	0,7	3,26
PM12	0,5	0,5	1,3	14,1	32,3	27,6	20,7	3,0	4,58
PH1	7,0	22,3	38,1	29,8	2,7	0,2	0,0	0,0	1,99
PH2	7,2	19,8	32,8	31,7	6,5	1,1	0,4	0,6	2,18
PH3	10,1	23,5	40,1	19,0	4,6	2,1	0,2	0,4	1,94
PH4	6,6	22,0	39,5	27,1	3,5	1,1	0,0	0,3	2,03

Tabelle A9: Kationen- und Anionengehalte wäßriger Auszüge der historischen Putze

Probe	Kationen				Anionen				
	Ca ²⁺ / M.-%	Mg ²⁺ / M.-%	Na ⁺ / M.-%	K ⁺ / M.-%	NH ₄ ⁺ / M.-%	SO ₄ ²⁻ / M.-%	NO ₃ ⁻ / M.-%	NO ₂ ⁻ / M.-%	Cl ⁻ / M.-%
	PL44a	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,23	0,01	n. b.
PL44b	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,02	0,01	n. b.	0,04
PL45a	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,04	0,01	n. b.	0,06
PL45b	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,01	0,01	n. b.	0,04
PL46a	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,05	0,02	n. b.	0,13
PL46b	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,03	0,01	n. b.	0,04
PL47a	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	1,59	0,02	n. b.	0,06
PL47b	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,01	0,01	n. b.	0,08
PL48a	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,90	0,01	n. b.	0,06
PL48b	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,01	0,01	n. b.	0,07
PL49a	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,84	0,02	n. b.	0,27
PL49b	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,02	0,01	n. b.	0,14
PS1	0,59	0,04	0,06	0,12	n. b.	0,75	0,18	n. b.	1,19
PS2	0,29	0,04	0,06	0,12	n. b.	0,08	0,13	n. b.	0,93
PS3	0,51	0,04	0,06	0,16	n. b.	1,01	0,15	n. b.	0,81
PS4	0,24	0,03	0,04	0,10	n. b.	0,08	0,14	n. b.	0,71
PM1	1,74	0,02	0,01	0,02	<0,01	4,12	0,02	<0,01	0,09
PM2	0,38	0,01	0,01	0,02	<0,01	0,84	0,02	<0,01	0,03
PM3a	1,65	0,03	0,02	0,02	<0,01	3,88	0,02	<0,01	0,03
PM3b	0,44	0,02	0,02	0,02	<0,01	0,95	0,02	<0,01	0,03
PM4	0,99	0,02	0,02	0,01	<0,01	2,28	0,02	<0,01	0,05
PM5a	1,10	0,01	0,04	0,01	<0,01	2,40	0,04	0,01	0,06
PM5b	0,16	0,01	0,01	0,02	<0,01	0,35	0,09	<0,01	0,03
PM6	0,31	0,02	0,01	0,02	<0,01	0,58	0,10	0,01	0,07
PM7	0,53	0,02	0,01	0,02	<0,01	1,12	0,01	<0,01	0,02
PM8	0,39	0,03	0,01	0,03	0,01	0,82	0,06	<0,01	0,02
PM9	2,18	0,02	0,01	0,01	<0,01	5,66	0,03	<0,01	0,02
PM10	3,63	0,34	0,05	0,42	0,01	9,70	0,11	<0,01	0,09
PM11	0,81	0,24	0,03	0,11	<0,01	2,58	0,10	0,01	0,05
PM12	0,11	0,05	0,01	0,05	<0,01	0,18	0,02	0,01	0,02

n. b. nicht bestimmt

a oberflächennahe Zone 0-6 mm

b Tiefenzone, 7-12 mm

Tabelle A10: Mechanische Eigenschaften der historischen Putze; Druckfestigkeit β_D und dynamischer E-Modul E_{dyn}

Probe	β_D / N/mm ²	E_{dyn} / N/mm ²
PS1	n. b.	7600
PS2	4,0	7400
PS3	4,1	5100
PS4	2,9	4900
PM5	n. b.	35800

n. b. nicht bestimmt

Tabelle A11: Ergebnisse der Untersuchung historischer Proben aus der Torhalle in Lorsch und der Einhardbasilika in Steinbach mittels Hg-Druckporosimetrie

Probe	Rohdichte / g/ml	Reindichte / g/ml	Gesamtporosität / Vol.-%	Luftporen*		Kapillarporen*			Gelporen*	mittl. Porenradius / µm
				Bereich		Bereich			Bereich	
				1 >50 µm / Vol.-%	2 50-10 µm / Vol.-%	3 10-1 µm / Vol.-%	4 1-0,1 µm / Vol.-%	5 0,1-0,01 µm / Vol.-%	6 < 0,01 µm / Vol.-%	
Bohrkerne Kalkputz Torhalle Lorsch										
PL3	1,63	2,60	37,03	6,95	7,26	7,68	11,08	3,02	1,03	4,69
PL6	1,70	2,54	33,11	6,23	8,01	10,18	6,65	1,34	0,71	4,75
PL10	1,58	2,61	39,51	7,88	9,34	7,61	11,47	2,44	0,77	4,84
PL12	1,70	2,62	34,87	5,08	8,35	7,91	10,28	2,54	0,72	5,01
PL14	1,66	2,64	37,22	7,81	8,82	6,37	10,09	3,32	0,81	5,50
Kalkputze Einhardbasilika in Steinbach										
PS1	1,56	2,55	38,78	2,42	1,27	13,22	18,84	2,13	0,91	0,88
PS2	1,68	2,56	34,14	2,59	1,16	9,43	17,80	2,24	0,93	0,73
PS3	1,67	2,56	34,70	2,45	1,05	9,27	17,91	2,96	1,05	0,68
PS4	1,60	2,52	36,56	3,43	2,05	11,57	16,53	2,28	0,70	0,91

* Der Begriff Luftporen, Kapillar- und Gelporen wird für hydraulisch erhärtende Systeme verwendet. Sie sind zur Vergleichbarkeit angegeben.

Tabelle A12: Hygrische Eigenschaften der historischen Putze; Sorptionsfeuchte bei 53 % (u_{m53}) und 80 % (u_{m80}) rel. Luftfeuchte, Wasseraufnahmekoeffizient (ω) Wasseraufnahmegrad nach 24 h und absoluter Wasseraufnahmegrad, Wasserabgabekoeffizient (w_{ak}), Wasserabgabegrad nach 24 h (w_{ab24}) und absoluter Wasserabgabegrad (w_{ab}) sowie μ -Werte

Probe	u_{m53} / M.-%	u_{m80} / M.-%	ω / kg/(m ² ·√h)	W_{m24} / M.-%	W_m / M.-%	W_{ak} / kg/(m ² ·h)	W_{ab24} / M.-%	W_{ab} / M.-%	μ -Wert / -
PL3	2,5	n. b.	3,2	n. b.	17,5*	0,15	11,1	15,1	32
PL6	1,9	n. b.	2,4	n. b.	13,9*	0,23	6,7	12,0	21
PL9	2,0	n. b.	n. b.	n. b.	13,0*	0,06	8,9	11,0	29
PL10	3,4	n. b.	n. b.	n. b.	19,5*	0,15	12,3	16,1	21
PL11	4,6	n. b.	n. b.	n. b.	14,9*	0,02	3,7	10,3	17
PL12	3,0	n. b.	n. b.	n. b.	17,9*	0,17	10,5	14,9	22
PL15	3,3	n. b.	n. b.	n. b.	17,0*	0,07	11,1	13,7	25
PL16	2,5	n. b.	n. b.	n. b.	15,0*	0,10	10,1	12,5	19
PL17	2,0	n. b.	n. b.	n. b.	12,5*	0,05	8,5	10,5	15
PL19	3,2	n. b.	n. b.	n. b.	19,1*	0,16	12,8	15,9	21
PL22	5,8	n. b.	n. b.	n. b.	17,5*	0,03	9,5	11,7	17
PL24	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	23
PL25	2,4	n. b.	n. b.	n. b.	17,6*	0,16	10,8	15,2	16
PL26	2,6	n. b.	n. b.	n. b.	14,3+	0,08	9,4	11,7	20
PS1	1,7	2,8	13,6	21,6	23,1+	0,52	22,4	22,8	13
PS2	1,9	3,4	11,5	17,4	20,4+	0,35	19,2	19,7	14
PS3	1,7	2,8	12,4	18,1	20,0+	0,57	18,5	19,7	14
PS4	1,3	2,3	12,6	18,8	23,9+	0,45	22,8	23,3	13
PM1	1,7	2,2	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	52
PM3	1,7	2,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	51
PM5	1,8	2,0	0,5	1,9	5,6+	0,05	2,7	4,4	103

* Verfahren A, DIN 52617

+ Verfahren Vakuum

n. b. nicht bestimmt

Tabelle A13: Wasserabgabeverhalten der historischen Putzmörtel nach Methode Klopfer; anfängliche flächenbezogene Wassermenge der Probe (w_0), Stofffeuchte im Knickpunkt (w_{knick}), Zeitpunkt des Übergangs zum anderen Trocknungsabschnitt (t_{knick}), Verhältnis der im 1. Trocknungsabschnitt abgegebenen Wassermenge zum Wassergehalt bei Versuchsbeginn (w_{kn}), Verdunstungsmassenstromdichte (\dot{m}_{knick})

Mörtel	w_0 / kg/m ²	w_{knick} / kg/m ²	t_{knick} / h	w_{kn} / -	\dot{m}_{knick} / kg/(m ² ·h)
PS1	4,6	1,6	15,8	0,66	0,19
PS2	3,3	0,7	12,4	0,77	0,20
PS3	5,1	2,2	13,6	0,58	0,22
PS4	4,0	1,3	12,0	0,67	0,22

Tabelle A14: Analysen der verwendeten Bindemittel und Zusatzstoffe und mehlfeinen Zuschläge und Glühverlust. Die Analysen sind glühverlustfrei auf 100 M.-% normiert.

Bindemittel	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	GV
	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	M.-%											
CL90/1	98,61	0,75	0,09	0,35	0,07	0,03	0,02	0,02	0,00	0,02	0,03	3,86
CL90/2	97,00	0,80	0,20	0,20	0,10	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,14	1,70
CL90/3	98,78	0,81	0,09	0,41	0,07	0,03	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	5,28
WKH	97,86	1,22	0,01	0,59	0,17	0,04	0,03	0,04	0,01	0,01	0,01	26,01
KStM	98,35	0,90	0,14	0,42	0,02	0,03	0,02	0,07	0,02	0,02	0,02	42,61
HüS	38,77	7,70	11,36	37,17	0,58	0,30	0,30	0,19	0,86	0,26	2,50	0,00
PZ	64,48	1,72	3,54	20,23	6,55	0,16	0,04	0,00	0,99	0,02	2,27	0,75
Gips	41,03	1,34	0,05	0,64	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	56,89	14,86
HOZ	49,29	6,27	9,61	28,94	1,01	1,21	0,30	0,30	0,61	0,01	2,43	2,50
Mikro	48,61	4,38	9,88	27,41	1,32	1,12	0,26	0,16	1,02	0,01	5,81	1,20
TZ	36,64	1,09	36,59	3,66	16,99	3,33	1,20	0,06	0,24	0,10	0,10	1,30
Zuschlag	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	GV
	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	M.-%											
BVK	22,50	1,20	14,50	52,50	0,20	0,00	8,60	0,30	0,20	0,00	0,00	0,00
HGK	23,01	1,31	14,61	52,04	0,19	0,00	8,40	0,26	0,18	0,00	0,00	0,00
SP10	0,01	0,01	0,38	99,51	0,00	0,07	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

CL90/1 Branntkalk, 1. Lieferung

CL90/2 Branntkalk, 2. Lieferung

CL90/3 Branntkalk, 3. Lieferung

WKH Weißkalkhydrat CL90

KStM Kalksteinmehl

HüS Hüttensand gemahlen

PZ Portlandzement PZ 45 F HS/NA, heute CEM I 42,5 R HS/NA

Gips Rohgips, CaSO₄·2H₂O

HOZ Hochofenzement HOZ 35 L-NW HS/NA, heute CEM III/B 32,5 HS/NA

Mikro hochfeiner Hochofenzement für Injektionsmörtel

TZ Tonerdezement

BVK Borosilikatglaskugeln, Typ 3000 E

HGK Borosilikat-Hohlglaskugeln, Typ E 22

SP10 Quarzmehl mit einem Siebdurchgang bei 63 µm von 99,5 M.-%

Tabelle A15: Sieblinien der verwendeten Bindemittel, Zusätze und mehligten Zuschläge, bestimmt mittels Lasergranulometrie

Ø / µm	Bindemittel bzw. Zusatz											
	WKH /	PZ /	HOZ /	Mikro /	TZ /	HüS /	KStM /	Gips /	SP10 /	BVK /	HGK /	MHK /
µm	M.-%											
0,9	7,03	3,66	3,63	9,66	3,41	3,74	5,02	3,33	2,86	3,66	3,58	0,39
1,1	10,75	5,30	5,23	14,20	5,00	5,41	7,16	4,92	4,23	5,13	5,21	0,54
1,3	14,57	6,83	6,69	18,57	6,52	6,96	9,07	6,47	5,57	6,37	6,53	0,67
1,5	18,45	8,26	8,04	22,78	7,97	8,40	10,78	7,97	6,86	7,43	7,65	0,78
1,8	24,24	10,25	9,93	28,83	10,05	10,40	13,06	10,19	8,72	8,76	8,52	0,91
2,2	31,89	12,69	12,27	36,44	12,66	12,85	15,72	13,09	11,04	10,17	10,23	1,06
2,6	38,69	14,92	14,48	43,57	15,11	15,10	18,05	15,96	13,18	11,28	11,56	1,17
3,1	46,60	17,47	17,16	51,81	17,99	17,72	20,68	19,50	15,60	12,43	12,33	1,29
3,7	54,74	20,27	20,30	60,70	21,19	20,64	23,62	23,68	18,15	13,64	13,71	1,43
4,3	61,41	22,83	23,38	68,45	24,12	23,39	26,47	27,74	20,37	14,80	14,98	1,58
5,0	67,61	25,55	26,84	76,04	27,24	26,41	29,81	32,27	22,64	16,18	16,24	1,77
6,0	74,33	29,06	31,44	84,36	31,18	30,41	34,69	38,23	25,46	18,22	18,26	2,07
7,5	81,19	33,65	37,47	92,32	36,17	35,82	42,24	46,07	29,06	21,34	21,56	2,56
9,0	85,43	37,74	42,71	96,54	40,37	40,72	49,92	52,78	32,13	24,46	25,99	3,05
10,5	88,08	41,54	47,41	98,77	44,06	45,72	57,36	58,59	34,82	27,58	27,85	3,58
12,5	90,48	46,19	52,95	100,00	48,41	50,88	66,11	64,99	38,11	31,64	32,01	4,38
15,0	92,87	51,32	58,72	100,00	53,15	57,21	74,69	71,06	42,03	36,43	37,22	5,55
18,0	95,07	56,99	64,77	100,00	58,18	64,13	82,49	76,86	46,52	41,91	42,54	6,97
21,0	96,47	62,40	70,33	100,00	62,68	70,47	88,52	81,93	50,69	47,24	47,78	8,26
25,0	97,55	68,81	76,57	100,00	67,83	77,66	93,95	87,31	55,78	53,82	54,63	10,21
30,0	98,37	75,55	82,52	100,00	73,26	84,71	97,70	92,16	61,60	61,26	62,03	14,62
36,0	99,03	82,12	88,01	100,00	78,74	90,79	99,60	96,05	67,95	69,29	71,05	24,24
43,0	99,41	88,02	92,41	100,00	84,06	95,34	100,00	98,71	74,52	77,44	78,86	40,26
51,0	99,50	92,76	95,61	100,00	88,91	98,15	100,00	99,96	80,91	84,92	87,52	60,03
61,0	99,52	96,50	97,90	100,00	93,48	99,61	100,00	100,00	87,34	91,66	93,36	80,20
73,0	99,75	98,95	99,35	100,00	97,25	100,0	100,00	100,00	93,08	96,74	98,74	94,36
87,0	100,00	100,00	100,00	100,00	99,64	100,0	100,00	100,00	97,41	99,59	100,00	100,00
103,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0	100,00	100,00	99,75	100,00	100,00	100,00
123,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
147,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
175,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Dichte	2,24	3,10	2,85	2,85	3,24	2,84	2,70	2,32	2,65	2,54	0,22	-
sp. O.	11190	3900	4400	9300	3760	4450	5630	5960	3910	3790	3850	-
Blaine	-	2820	4050	-	3370	3020	3280	4020	3400	3250	3280	-

Bezeichnung der Bindemittel, Zusätze und Zuschläge siehe Tabelle **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

sp. O. spez. Oberfläche aus der Kornverteilung der Lasergranulometrie berechnet

Blaine spez. Oberfläche nach der Blaine Methode bestimmt

SP10 Quarzmehl

BVK Borosilikat-Vollglaskugeln

HGK Borosilikat-Hohlgaskugeln

Tabelle A16: Zusammensetzung der Haftmörtel, die Zugabe der Zusatzmittel erfolgte bezogen auf den Trockenmörtel

Mörtel-Nr.	Bindemittel	/ M.-%	Binde- mittel	/ M.-%	Binde- mittel	/ M.-%	Zuschlag	/ M.-%	B/Z
VH1	WKH	17,5	HOZ	7,5	-	-	SP10	75	1:3
VH2	WKH	12,5	HOZ	12,5	-	-	SP10	75	1:3
VH3	WKH	7,5	HOZ	17,5	-	-	SP10	75	1:3
VH4	KStM	17,5	Mikro	7,5	-	-	SP10	75	1:3
VH5	KStM	12,5	Mikro	12,5	-	-	SP10	75	1:3
VH6	WKH	17,5	Mikro	7,5	-	-	SP10	75	1:3
VH7	WKH	12,5	Mikro	12,5	-	-	SP10	75	1:3
VH8	TZ	12,5	HüS	12,5	KStM	0,0	SP10	75	1:3
VH9	TZ	8,33	HüS	8,33	KStM	8,33	SP10	75	1:3
VH10	TZ	6,25	HüS	6,25	KStM	12,5	SP10	75	1:3
VH11	TZ	17,5	HüS	0,0	KStM	7,5	SP10	75	1:3
VH12	HGZ	25	-	-	-	-	SP10	75	1:3
VH13	TZ	22,5	WKH	2,5	-	-	SP10	75	1:3
VH14	TZ	20,0	WKH	5,0	-	-	SP10	75	1:3
Mörtel-Nr.	Bindemittel	/ M.-%	Zusatz- mittel	/ M.-%	Zusatz- mittel	/ M.-%	Zuschlag	/ M.-%	B/Z
H1	HGZ ¹	20	Kd P ⁴	0,0	MC ⁵	0,0	SP10 ⁶	80	1:4
H2	HGZ	20	Kd P	1,0	MC	0,0	SP10	80	1:4
H3	HGZ	20	Kd P	2,0	MC	0,0	SP10	80	1:4
H4	HGZ	20	Kd P	0,0	MC	0,1	SP10	80	1:4
H5	HGZ	20	Kd P	0,0	MC	0,2	SP10	80	1:4
H6	HGZ	20	Kd P	1,0	MC	0,1	SP10	80	1:4
H7	TZ ²	25	Kd P	0,0	MC	0,0	SP10	75	1:3
H8	TZ+	25	Kd P	1,25	MC	0,0	SP10	75	1:3
H9	TZ+	25	Kd P	2,50	MC	0,0	SP10	75	1:3
H10	TZ+	25	Kd P	0,0	MC	0,1	SP10	75	1:3
H11	TZ+	25	Kd P	0,0	MC	0,2	SP10	75	1:3
H12	TZ+	25	Kd P	1,25	MC	0,1	SP10	75	1:3
H13	HOZ ³	20	Kd P	0,0	MC	0,0	SP10	80	1:4
H14	HOZ+	20	Kd P	1,0	MC	0,0	SP10	80	1:4
H15	HOZ+	20	Kd P	2,0	MC	0,0	SP10	80	1:4
H16	HOZ+	20	Kd P	0,0	MC	0,1	SP10	80	1:4
H17	HOZ+	20	Kd P	0,0	MC	0,2	SP10	80	1:4
H18	HOZ+	20	Kd P	1,0	MC	0,1	SP10	80	1:4

¹ HGZ, zusammengesetzt aus: 83 M.-% HüS, 10 M.-% Gips und 7 M.-% PZ² TZ++, zusammengesetzt aus: 33,3 M.-% TZ, 33,3 M.-% HüS und 33,3 M.-% KStM³ HOZ+, zusammengesetzt aus: 70 M.-% (CEM III/B 32,5 NW/HS NA), 30 M.-% KStM⁴ Kd P, Kunststoffredispersionspulver: Vinylacetat-Vinylester-Copolymerisat⁵ MC, Methylhydroxyethylcellulose, Viskosität 20000-25000 mPa⁶ SP10, Quarzmehl

Tabelle A17: Sulfat- und Alkaliwiderstandsfähigkeit der Haftmörtel der Vorversuche nach Koch/Steinegger

Mörtel-Nr.	Verbrauch 2n H ₂ SO ₄ / ml/Prisma	β_{BZ}				β_D			
		21 d / N/mm ²	35 d / N/mm ²	49 d / N/mm ²	77 d / N/mm ²	21 d / N/mm ²	35 d / N/mm ²	49 d / N/mm ²	77 d / N/mm ²
		Wasserlagerung				Wasserlagerung			
VH1		0,84	0,82	0,87	1,11	1,3	1,6	2,0	2,3
VH2		1,34	2,05	2,17	2,26	3,7	4,3	4,9	5,4
VH3		2,66	3,76	4,18	4,07	7,0	8,6	8,2	9,8
VH4		0,88	0,84	0,80	1,02	2,2	2,6	2,8	3,4
VH5		3,00	3,36	3,10	2,77	9,1	9,3	9,9	10,9
VH6		0,65	0,70	0,62	0,57	1,1	1,2	1,2	1,0
VH7		1,51	2,15	2,06	1,88	4,6	5,3	5,4	5,5
VH8		2,24	2,75	3,00	2,81	7,7	8,9	9,6	10,3
VH9		1,05	1,07	1,32	1,18	1,5	1,4	1,5	2,2
VH10		1,03	0,59	0,53	1,03	0,9	0,7	0,8	1,5
VH11		1,33	1,56	1,94	1,76	5,0	4,5	3,7	4,1
VH12		2,51	3,15	3,37	3,34	4,9	4,7	4,9	5,9
VH13		0,94	0,96	1,01	1,48	1,2	1,1	1,2	1,5
VH14		0,91	*Risse	*	*	0,3	*	*	*
		Sulfatlagerung				Sulfatlagerung			
VH1	24,1	0,84	1,10	1,52	1,67	1,3	2,3	3,3	4,7
VH2	14,0	1,34	2,62	2,94	2,48	3,7	5,7	6,0	7,0
VH3	6,9	2,66	4,30	4,45	4,19	7,0	9,6	9,7	11,0
VH4	2,6	0,88	0,92	0,90	0,88	2,2	3,6	2,8	3,2
VH5	1,9	3,00	2,17	2,14	2,35	9,1	11,0	9,9	10,7
VH6	25,5	0,65	1,01	1,45	1,57	1,1	2,9	3,8	5,5
VH7	18,0	1,51	*Risse	*	*	4,6	*Risse	*	*
VH8	2,0	2,24	*Risse	*	*	7,7	*Risse	*	*
VH9	2,6	1,05	*15	*	*	1,5	*15	*	*
VH10	0	1,03	*4	*	*	0,9	*4	*	*
VH11	3,9	1,33	*15	*	*	5,0	*15	*	*
VH12	1,9	2,51	3,34	3,38	2,55	4,9	4,93	5,29	5,92
VH13	0	0,94	*3	*	*	1,2	*3	*	*
VH14	0	0,91	*2	*	*	0,3	*2	*	*

* Prismen zerstört, die nachgestellte Zahl gibt den Tag des völligen Zerfalls nach der Einlagerung in die Sulfatlagerung an

Tabelle A18: Relative Biegezug und Druckfestigkeiten der Haftmörtel der Vorversuche nach Prüfung des Sulfatwiderstandes nach Koch/Steinegger

Mörtel-Nr.	Verbrauch 2n H ₂ SO ₄ / ml/Prisma	β_{BZ}				β_D			
		21 d / N/mm ²	35 d / N/mm ²	49 d / N/mm ²	77 d / N/mm ²	21 d / N/mm ²	35 d / N/mm ²	49 d / N/mm ²	77 d / N/mm ²
VH1	24,1	1,00	1,34	1,75	1,50	1,00	1,44	1,65	2,04
VH2	14,0	1,00	1,28	1,35	1,10	1,00	1,33	1,22	1,30
VH3	6,9	1,00	1,14	1,06	1,03	1,00	1,12	1,18	1,12
VH4	2,6	1,00	1,10	1,13	0,86	1,00	1,38	1,00	0,94
VH5	1,9	1,00	0,65	0,69	0,85	1,00	1,18	1,00	0,98
VH6	25,5	1,00	1,44	2,34	2,75	1,00	2,42	3,17	5,50
VH7	18,0	1,00	*Risse	*	*	1,00	*Risse	*	*
VH8	1,1	1,00	*Risse	*	*	1,00	*Risse	*	*
VH9	0,9	1,00	*15	*	*	1,00	*15	*	*
VH10	0,9	1,00	*4	*	*	1,00	*4	*	*
VH11	0,6	1,00	*15	*	*	1,00	*15	*	*
VH12	1,2	1,00	1,06	1,00	0,76	1,00	1,05	1,08	1,00
VH13	-	1,00	*3	*	*	1,00	*3	*	*
VH14	-	1,00	*2	*	*	1,00	*2	*	*

Tabelle A19: Biegezug- und Druckfestigkeiten sowie relative Biegezug- und Druckfestigkeiten der Haftmörtel (Vorversuche) nach Prüfung des Sulfatwiderstandes in gesättigter Gipslösung

Mörtel-Nr.	Verbrauch 2n H ₂ SO ₄ / ml/Prisma	β_{BZ}		β_D	
		21 d / N/mm ²	77 d / N/mm ²	21 d / N/mm ²	77 d / N/mm ²
VH8	1,1	1,84	3,26	6,9	8,7
VH9	0,9	0,78	1,42	1,7	3,6
VH10	0,9	0,58	0,92	0,81	2,22
VH11	0,6	2,54	3,27	5,4	5,6
VH12	1,2	2,27	2,95	5,6	7,4
VH13	0	*	*	*	*
VH14	0	*	*	*	*
VH8	1,1	0,82	1,16	0,90	0,84
VH9	0,9	0,74	1,20	1,13	1,64
VH10	0,9	0,56	0,89	0,90	1,48
VH11	0,6	1,91	1,86	1,08	1,37
VH12	1,2	0,90	0,88	1,14	1,25
VH13	0	*	*	*	*
VH14	0	*	*	*	*

Tabelle A20: Frischmörteleigenschaften und hygrische Dehnung der Haftmörtel (Vor- und Hauptversuche)

Mörtel-Nr.	W/B / -	WA / %	WRV / %	ϵ_{s1} / mm/m	ϵ_q / mm/m	ϵ_{s2} / mm/m
VH1	1,34	33,6	85,1	-9,43	0,18	-0,16
VH2	1,29	32,2	82,9	-3,52	0,29	-0,13
VH3	1,22	30,5	80,8	-2,78	0,68	-0,22
VH4	1,17	29,4	78,0	-2,68	0,05	-0,05
VH5	1,18	29,5	79,8	-2,97	0,08	-0,18
VH6	1,35	33,8	85,2	-5,01	0,31	-0,18
VH7	1,35	33,8	83,4	-4,33	0,61	-0,27
VH8	1,13	28,3	83,2	-0,82	0,37	-0,26
VH9	1,13	18,3	84,0	-0,66	0,31	-0,18
VH10	1,13	28,3	84,3	-0,55	0,20	-0,12
VH11	1,21	30,3	84,4	-0,86	0,47	-0,21
VH12	1,22	30,5	78,3	-1,05	0,35	-0,20
VH13	1,30	32,5	96,7	-0,55	0,25	-0,20
VH14	1,46	36,5	96,5	-0,28	0,15	-0,11
H1	1,47	29,4	77,7	-0,77	0,17	-0,25
H2	1,47	29,4	81,4	-0,85	0,14	-0,34
H3	1,44	28,8	82,6	-1,18	0,31	-0,37
H4	1,58	31,6	99,4	-0,85	0,23	-0,27
H5	1,72	34,4	99,5	-1,02	0,27	-0,29
H6	1,58	31,6	99,6	-0,95	0,30	-0,35
H7	1,13	28,2	84,1	-0,59	0,31	-0,21
H8	1,17	29,4	86,7	-0,65	0,22	-0,26
H9	1,22	30,5	87,4	-0,73	0,33	-0,28
H10	1,31	32,7	98,2	-0,53	0,15	-0,39
H11	1,37	34,4	98,3	-0,55	0,14	-0,37
H12	1,31	32,7	98,4	-0,52	0,15	-0,32
H13	1,45	29,1	81,6	-1,61	0,25	-0,21
H14	1,45	29,1	87,6	-1,55	0,31	-0,22
H15	1,45	29,1	87,9	-1,58	0,35	-0,26
H16	1,61	32,2	94,8	-1,69	0,37	-0,26
H17	1,75	35,0	98,8	-1,54	0,26	-0,24
H18	1,55	31,1	98,1	-1,77	0,38	-0,37

Tabelle A21: Mechanische Eigenschaften der Haftmörtel, dynamischer E-Modul (E_{dyn}), Biegezugfestigkeit (β_{BZ}), Druckfestigkeit (β_{D}) und Haftzugfestigkeit (β_{HZ})

Mörtel-Nr.	E_{dyn}		β_{BZ}		β_{D}		β_{HZ}
	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²
VH1	1650	3950	0,36	0,91	1,0	2,3	0,07
VH2	4250	8400	1,01	1,65	2,5	6,0	0,15
VH3	7850	11800	1,54	1,64	5,0	9,9	0,22
VH4	4950	4600	1,03	1,03	3,1	4,0	0,09
VH5	11200	11150	2,30	1,95	8,4	11,5	0,26
VH6	1900	2400	0,38	0,55	1,4	1,6	0,09
VH7	7400	8500	1,57	2,15	5,1	7,3	0,62
VH8	16950	11050	1,31	2,63	7,0	14,2	0,55
VH9	2550	2900	0,71	0,80	1,0	1,9	0,11
VH10	1500	1700	0,37	0,45	1,0	1,1	0,00
VH11	16850	16400	1,82	1,93	5,9	6,3	0,92
VH12	8900	9100	1,77	2,38	5,2	5,9	0,11
VH13	3550	4150	0,67	0,83	1,1	2,3	0,27
VH14	3800	1850	0,25	0,32	0,3	0,7	0,08
H1	7700	8700	1,82	2,19	4,6	5,5	0,16
H2	7300	7900	1,92	2,57	4,7	7,0	0,91
H3	6800	7500	1,95	2,79	5,2	8,6	1,27
H4	6300	6700	1,67	1,72	3,3	4,0	0,19
H5	4700	5000	1,32	1,51	2,4	3,0	0,17
H6	4900	6900	1,46	1,83	2,8	3,8	0,33
H7	2600	2900	0,71	0,80	1,0	1,8	0,12
H8	1800	2000	0,51	0,61	1,2	1,2	0,69
H9	1000	1500	0,27	0,36	0,7	1,0	0,70
H10	1500	2000	0,28	0,34	0,6	0,8	0,17
H11	800	900	0,21	0,25	0,5	0,6	0,09
H12	900	900	0,19	0,24	0,5	0,6	0,69
H13	5200	11100	1,37	2,51	4,0	7,7	0,64
H14	5500	10000	1,60	2,15	3,6	7,3	0,87
H15	4400	9400	1,08	2,09	3,0	6,4	0,81
H16	6300	9500	1,12	2,21	3,0	5,8	0,21
H17	3200	6500	0,77	2,11	1,8	3,8	0,17
H18	2800	5400	0,60	0,71	1,3	2,6	0,23

Tabelle A22: Wasseraufnahmekoeffizienten (ω), μ -Werte, Ausblühverhalten und Frost-Tauwechsel-Widerstand (FTW) der Haftmörtel der Hauptuntersuchungen. Beim Ausblühverhalten sind angegeben der Zyklus des Auftretens der ersten Ausblühungen sowie die Art enthalten Salze

Haftmörtel	ω / kg/(m ² ·√h)	μ -Wert / -	Rohdichte / g/cm ³	Ausblühver- halten	FTW Absplitterungen / M.-%
H1	10,5	8	1,59	15, Cc ¹ , Cs ²	56,4
H2	4,0	13	1,57	-	19,1
H3	2,0	14	1,56	-	0,0
H4	3,4	8	1,45	-	0,7
H5	2,6	8	1,28	9, Cc, Cs	0,0
H6	2,2	12	1,42	12, Cc, Cs	0,0
H7	19,4	11	1,63	-	75,0
H8	10,1	10	1,47	5, Cc, Cs	0,0
H9	9,8	9	1,32	3, Cc, Cs	0,0
H10	14,7	8	1,48	-	0,0
H11	9,9	7	1,35	-	0,0
H12	13,6	8	1,36	12, Cc	0,0
H13	5,2	14	1,66	9, Cc	50,5
H14	2,4	18	1,64		0,0
H15	1,9	14	1,54	12, Cc, Cs	0,0
H16	4,6	12	1,47		0,0
H17	5,2	11	1,34	14, Cc, Cs	0,0
H18	3,6	12	1,25		0,0

¹ Cc = Calciumcarbonat (Calcit)

² Cs = Gips

Tabelle A23: Mischungsverhältnisse der Hinterfüllmörtel der Vorversuche

Hinterfüllmörtel- kurzbezeichnung	Bindemittel	Zu- schlag- art	B/Z- Verh. / GT	Zusätze [M.-%] ¹					
				FM	ST	MC	BVK	Kd	PUR ²
VHOZ1	HOZ ⁺ ³	SP10	1:1	0,3	0,1	0,1	5,0	4,0	3,75
VHOZ2	HOZ ⁺	SP10	1:1	0,3	0,1	0,1	5,0	2,0	3,75
VTZ1	TZ ⁺ ⁴	SP10	1:1	0,3	0,1	0,1	2,5	2,0	3,75
VTZ2	TZ ⁺	SP10	1:1	0,3	0,1	0,0	2,5	2,0	3,75
VTZ3	TZ ⁺⁺ ⁵	SP10	1:1	0,3	0,1	0,1	2,5	2,0	3,75
VTZ4	TZ ⁺⁺	SP10	1:1	0,3	0,1	0,0	2,5	2,0	3,75
VHGZ1	HGZ	SP10	1:1	0,3	0,1	0,1	5,0	2,0	3,75
VHGZ2	HGZ	SP10	1:1	0,3	0,1	0,0	5,0	2,0	3,75

Erläuterung:

¹ Zusatzmittel in M.-% bezogen auf den Trockenmörtel B/Z-Verh. / GT = Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis in Gewichtsteilen

² PUR bedeutet immer die Zugabe von 4 M.-% Emulgator (Em) vom angegebenen PUR-Gehalt

³ HOZ, zusammengesetzt aus: 70 M.-% (CEM III/B 32,5 NW/HS NA), 30 M.-% KStM

⁴ TZ⁺, zusammengesetzt aus: 70 M.-% TZ und 30 M.-% KStM

⁵ TZ⁺⁺, zusammengesetzt aus: 33,3 M.-% TZ, 33,3 M.-% HüS und 33,3 M.-% KStM

Tabelle A24: Optimierung der Frischmörteleigenschaften der Hinterfüllmörtel der Vorversuche mit dem Bindemittel HGZ (Rezeptur VHGX)

Zusatzmengen an FM und ST bezogen auf den Trockenmörtel bei einem W/B von 1,0 / M.-%	Auslaufzeit Trichter ¹ / sec	Penetrations-tiefe / cm	Sedimentation nach			
			0,25 h / mm	0,5 h / mm	0,5 / mm	2,0 / [mm]
FM/ST						
0,00/0,00	6,0	1	1	3	8	11
0,025/0,075	10,6	8	1,5	3	9	11
0,05/0,150	12,8	1	3	7	15	34
0,075/0,225	15,4	0	3	13	22	27
0,10/0,20	16,5	0	3	7,5	23	28
0,10/0,30	16,5	6	1	6	19	26
FM ST						
0,00/0,00	6,0	1	1	3	8	11
0,075/0,025	8,1	2	3	9	22	35
0,15/0,05	10,1	9	2	7	27	37
0,20/0,10	11,0	3	2	5	10	30
0,30/0,30	12,3	12	3	7	11	25
0,375/0,125	14,2	12	1	8	12	26
0,75/0,25	19,5	11	1	12	20	40

¹ KNÖFEL 1993, S. 157, Verfahren 4.4.1.4

Tabelle A25: Frischmörteleigenschaften, hygrische Dehnungen der Hinterfüllmörtel der Vorversuche und von ausgesuchten Hinterfüllmörteln, Wasseraufnahmekoeffizienten und μ -Werte

Mörtel	W/B	WRV	Auslaufzeit ¹	Sedimentation nach 120 min	ϵ_{s1}	ϵ_q	ϵ_{s2}	ω	μ -Wert
	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	-	%	sec		mm/m	mm/m	mm/m	kg/(m ² ·√h)	-
VHOZ1	1,2	86,2	22	4	-1,97	0,71	-0,80	n. b.	n. b.
VHOZ2	1,2	86,3	36	6	-1,71	0,65	-0,74	1,1	31
VTZ1	1,8	71,9	17	6	-2,18	2,32	-1,50	n. b.	n. b.
VTZ2	1,6	46,6	16	10	-1,98	2,05	-1,37	n. b.	n. b.
VTZ3	1,8	77,2	21	6	-1,73	2,09	-1,42	n. b.	n. b.
VTZ4	1,6	49,2	18	9	-1,65	1,95	-1,32	n. b.	n. b.
VHGX1	1,3	88,2	29	0	-1,18	0,40	-0,28	n. b.	n. b.
VHGX2	1,0	81,5	29	9	-1,05	0,35	-0,26	8,6	18

¹ KNÖFEL 1993, S. 157, Verfahren 4.4.1.4

n. b. nicht bestimmt

Tabelle A26: Festigkeiten der Hinterfüllmörtel der Vorversuche; E-Modul (E_{dyn}), Biegezugfestigkeit (β_{BZ}), Druckfestigkeit (β_{D}), und Haftzugfestigkeit (β_{HZ})

Mörtel	E_{dyn}		β_{BZ}		β_{D}		β_{HZ}	
	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	1 a vor Ort* / N/mm ²
VHOZ1	9900	11800	0,65	1,57	2,6	3,0	0,20	n. b.
VHOZ2	11100	12200	0,68	1,60	2,7	3,2	0,16	0,29
VTZ1	9600	9700	0,37	0,51	0,9	0,8	0,04	n. b.
VTZ2	10100	10900	0,72	0,60	2,1	1,8	0,32	n. b.
VTZ3	600	700	0,15	0,23	0,4	0,4	0,04	n. b.
VTZ4	1100	1000	0,31	0,29	0,8	0,7	0,07	n. b.
VHGZ1	10400	13500	0,47	0,63	1,9	3,6	0,12	n. b.
VHGZ2	11650	13800	0,54	1,09	4,2	7,1	0,18	0,17

n. b. nicht bestimmt

* Haftzugfestigkeit, 1 Jahr nach der Applikation an verschiedenen Musterflächen sowohl im Innen- als auch Außenbereich des ehemaligen Zisterzienserklosters Heydau

Tabelle A27: Ausblühverhalten der Hinterfüllmörtel der Vorversuche. Angegeben ist der Zyklus des ersten Auftretens der Ausblühungen sowie die Art der Ausblühung

Mörtel	Zyklus	Ausblühung	
		CaCO ₃	CaSO ₄ ·2H ₂ O
VHOZ1	10	+	+
VHOZ2	12	+	+
VTZ1	12	+	+
VTZ2	12	+	+
VTZ3	17	+	+
VTZ4	12	+	+
VHGZ1	9	+	+
VHGZ2	-	-	-

- keine Ausblühungen

+ kaum erkennbar

++ gut erkennbar

+++ dicke Krusten

Tabelle A28: Zusammensetzung der Hinterfüllmörtel für die Optimierung der Frischmörteleigenschaften der Hauptversuche

Hinterfüllmörtel- kurzbezeichnung	Binde- mittel	Zu- schlag- art	B/Z- Verh. / GT	Zusätze / M.-% ¹		
				FM	ST	IH
FHGZ	HGZ	SP10	1:1	0,3	0,1	0,1
FHOZ	HOZ ²	SP10	1:1	0,3	0,1	0,1
FMikro	Mikro	KStM	1:1	0,3	0,1	0,0

Erläuterung:

¹ Zusätze in M.-% bezogen auf den Trockenmörtel; B/Z-Verh. / GT (Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis in Gewichtsteilen)

² HOZ+ zusammengesetzt aus: 70 M.-% HOZ und 30 M.-% KStM

Tabelle A29: Optimierung der Frischmörteleigenschaften des Hinterfüllmörtels FHGZ durch verschiedene Zusätze (additive Zugabe)

Wasser/Bindemittel-Wert W/B 1 : 1,0 / -	Auslaufzeit / s	Penetrations- tiefe / cm	Sedimentation nach			
			0,25 h / mm	0,5 h / mm	0,5 / mm	2,0 / mm
BVK						
0,0	94	8	10	15	22	40
2,5	92	8	10	16	21	39
5,0	92	10	9	16	23	40
7,5	90	10	15	22	29	42
10,0	90	12	18	22	28	41
12,5	95	12	20	25	32	43
15,0	96	12	20	27	33	42
HGK						
0,00	94	8	10	15	22	40
0,28	93	8	10	17	23	41
0,56	94	9	11	18	24	41
0,84	96	9	9	15	20	43
1,12	96	10	10	14/1	22/2	42/5
1,40	98	9	9	14/2	19/3	40/7
1,68	99	9	8	12/2	16/6	35/12
PUR + 10 M.-% BVK						
0,0	90	12	5	22	29	42
2,0	70	12	8	17	15	30
4,0	58	12	3	13	20	25
6,0	61	12	3	4	23	24
8,0	63	12	3	7	10	25
10,0	69	12	1	4	8	21
12,0	68	12	1	4	8	13
14,0	72	12	1	3	6	9
MC + 10 M.-% BVK + 4 M.-% PUR						
0,00	58	12	3	17	20	25
0,02	79	11	3	12	16	19
0,04	90	9	3	8	12	16
0,06	95	6	2	5	9	13
0,08	101	2	2	3	5	9
0,10	111	0	1	2	5	6
0,12	127	0	1	1	4	7
0,14	146	0	1	1	3	4
Kd P, + 10% BVK + 4 M.-% PUR						
0,0	58	12	3	17	20	25
2,0	65	8	3	18	21	23
4,0	69	8	3	17	19	26
6,0	73	6	2	10	15	20
8,0	77	3	1	5	12	18
10,0	82	4	1	4	11	15
Kd L + 10% BVK + 4 M.-% PUR						
0,0	58	12	3	17	20	25
2,0	55	12	3	16	18	23
4,0	59	12	3	15	16	22
6,0	63	12	3	11	13	19
8,0	70	11	2	6	13	22
10,0	72	9	2	7	9	19

Tabelle A30: Optimierung der Frischmörteleigenschaften des Hinterfüllmörtels FHOZ durch additive Zugabe verschiedene Zusätze.

Wasser/Bindemittel-Wert W/B 1 : 1,0 / -	Auslaufzeit / s	Penetrations- tiefe / cm	Sedimentation nach			
			0,25 h / mm	0,5 h / mm	0,5 / mm	2,0 / mm
BVK						
0,0	107	6	6	11	18	33
2,5	103	8	6	11	19	33
5,0	100	10	7	13	18	36
7,5	96	12	9	12	20	35
10,0	98	12	11	15	22	34
12,5	99	12	13	16	21	33
15,0	99	12	11	14	20	32
HGK						
0,00	107	6	6	11	18	33
0,28	106	8	6	12	20	30
0,56	104	9	7	10	18	30
0,84	101	10	5	8	17	31
1,12	102	10	4	7/1	16/3	29/5
1,40	103	9	3	7/1	16/4	28/6
1,68	106	8	3	7/3	14/6	25/10
PUR + 10 M.-% BVK						
0,0	98	12	11	15	22	34
2,0	89	12	9	12	14	29
4,0	80	12	8	10	12	23
6,0	88	12	6	8	12	20
8,0	95	12	3	6	10	15
10,0	100	12	1	6	6	9
12,0	103	12	2	3	3	6
14,0	118	12	1	2	3	4
MC + 10 M.-% BVK + 4 M.-% PUR						
0,00	80	12	8	10	12	23
0,02	82	12	8	9	10	19
0,04	86	12	7	9	9	13
0,06	89	12	7	8	8	10
0,08	94	12	4	4	5	8
0,10	100	12	2	2	4	5
0,12	112	10	2	1	3	4
0,14	121	6	1	1	2	4
Kd P, + 10 M.-% BVK + 4 M.-% PUR						
0,0	94	12	4	4	5	8
2,0	106	11	2	2	3	6
4,0	109	8	2	2	3	5
6,0	115	6	2	2	3	8
8,0	118	7	1	3	4	8
10,0	121	3	1	2	3	5
Kd L + 10 M.-% BVK + 4 M.-% PUR + 0,08 M.-% MC						
0,0	94	12	4	4	5	8
2,0	84	12	2	3	6	7
4,0	88	12	2	3	5	6
6,0	89	10	2	3	5	5
8,0	92	8	1	3	6	4
10,0	96	8	1	3	5	6

Tabelle A31: Optimierung der Frischmörteleigenschaften des Hinterfüllmörtel FMikro durch verschiedene Zusätze (additive Zugabe)

Wasser/Bindemittel-Wert W/B 1 : 1,0 / -	Auslaufzeit / s	Penetrations- tiefe / cm	Sedimentation nach			
			0,25 h / mm	0,5 h / mm	0,5 / mm	2,0 / [mm]
BVK						
0,0	64	2	0	1	2	2
2,5	62	5	0	1	2	3
5,0	61	8	1	2	4	6
7,5	61	10	1	3	6	12
10,0	60	12	1	4	6	16
12,5	60	12	2	5	9	17
15,0	61	12	2	5	10	18
HGK						
0,00	64	2	0	1	2	1
0,28	64	3	0	0	1	1
0,56	64	3	0	0	0	1
0,84	63	6	0	0	0	0/1
1,12	62	7	0	0	0/1	0/2
1,40	61	6	0	0/1	0/3	0/6
1,68	62	5	0	0/1	0/5	0/8
PUR + 10 M.-% BVK						
0,0	60	12	1	4	8	16
2,0	56	12	1	3	6	10
4,0	51	12	1	1	2	4
6,0	51	12	0	1	2	3
8,0	53	12	0	1	2	2
10,0	56	12	0	0	1	2
12,0	56	12	0	0	0	1
14,0	57	12	0	0	0	0
MC + 10 M.-% BVK + 4 M.-% PUR						
0,00	51	12	1	1	2	4
0,02	52	11	0	0	2	4
0,04	54	10	0	0	1	3
0,06	64	10	0	0	0	3
0,08	72	10	0	0	0	3
0,10	83	10	0	0	0	2
0,12	97	6	0	0	0	2
0,14	117	5	0	0	0	2
Kd P + 10% BVK + 4 M.-% PUR						
0,0	51	12	1	1	2	4
2,0	49	12	1	1	2	4
4,0	53	12	1	1	2	4
6,0	59	11	0	1	2	4
8,0	59	10	0	0	1	3
10,0	63	10	0	0	1	3
Kd L + 10% BVK + 4 M.-% PUR						
0,0	51	12	1	1	2	4
2,0	55	11	1	2	6	8
4,0	55	10	2	3	8	11
6,0	57	10	3	5	8	12
8,0	57	9	3	5	10	14
10,0	58	9	4	7	11	15

Tabelle A32: Mischungsverhältnisse der Hinterfüllmörtel der Hauptuntersuchungen

Hinterfüllmörtel- kurzbezeichnung	Binde- mittel	Zuschlag		B/Z- Verh. / GT	Zusätze								
		/ M.-%			/ M.-% ¹								
		SP10	BVK		FM	ST	MC	IH	Kd	PUR ²			
Kd L													
HGZ1	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	0,0	0,0			
HGZ2	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	0,0	4,0			
HGZ3	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	0,0	7,5			
HGZ4	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	0,0	10,0			
HGZ5	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	0,0	12,5			
HGZ6	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	0,0	15,0			
HGZ1 Kd	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	2,0	0,0			
HGZ2 Kd	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	2,0	4,0			
HGZ3 Kd	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	2,0	7,5			
HGZ4 Kd	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	2,0	10,0			
HGZ5 Kd	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	2,0	12,5			
HGZ6 Kd	HGZ	80	20	1:1	0,3	0,1	0,00	0,0	2,0	15,0			
Kd L													
HOZ1	HOZ+ ³	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	0,0	0,0			
HOZ2	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	0,0	4,0			
HOZ3	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	0,0	7,5			
HOZ4	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	0,0	10,0			
HOZ5	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	0,0	12,5			
HOZ6	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	0,0	15,0			
HOZ1 Kd	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	2,0	0,0			
HOZ2 Kd	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	2,0	4,0			
HOZ3 Kd	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	2,0	7,5			
HOZ4 Kd	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	2,0	10,0			
HOZ5 Kd	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	2,0	12,5			
HOZ6 Kd	HOZ+	80	20	1:1	0,3	0,1	0,08	0,0	2,0	15,0			
Kd P													
Mikro1	Mikro	KStM			80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	0,0	0,0
Mikro2	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	0,0	4,0	0,0	4,0	
Mikro3	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	0,0	7,5	0,0	7,5	
Mikro4	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	0,0	10,0	0,0	10,0	
Mikro5	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	0,0	12,5	0,0	12,5	
Mikro6	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	0,0	15,0	0,0	15,0	
Mikro1 Kd	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	2,0	0,0	0,0	0,0	
Mikro2 Kd	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	2,0	4,0	0,0	4,0	
Mikro3 Kd	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	2,0	7,5	0,0	7,5	
Mikro4 Kd	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	2,0	10,0	0,0	10,0	
Mikro5 Kd	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	2,0	12,5	0,0	12,5	
Mikro6 Kd	Mikro	80	20	1:1	4,0	0,0	0,00	4,0	2,0	15,0	0,0	15,0	

Erläuterung:

¹ Zusatzmittel in M.-% bezogen auf den Trockenmörtel B/Z-Verh. / GT = Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis in Gewichtsteilen

² PUR bedeutet immer die Zugabe von 4 M.-% Emulgator (Em) vom angegebenen PUR-Gehalt

³ HOZ+ zusammengesetzt aus: 70 M.-% CEM III/B 32,5 NW/HS/NA und 30 M.-% KStM

Tabelle A33: Wasser/Bindemittel-Wert (W/B), Wasseranspruch (WA), Ausbreitmaß (AM) und hygrische Dehnungen; 1. Schwinden (ϵ_{s1}), Quellen (ϵ_q) und 2. Schwinden (ϵ_{s2}) der Hinterfüllmörtel der Hauptuntersuchungen

Mörtel	W/B / -	WA / %	AM / cm	ϵ_{s1} / mm/m	ϵ_q / mm/m	ϵ_{s2} / mm/m
HGZ1	0,46	415	18,0	-2,11	0,22	-0,10
HGZ2	0,36	325	17,5	-1,01	1,30	-0,83
HGZ3	0,34	305	17,0	-1,56	5,30	-4,95
HGZ4	0,32	290	17,0	-2,85	18,67	-7,84
HGZ5	0,29	265	17,0	-3,35	21,48	-9,46
HGZ6	0,30	268	17,5	-4,21	26,73	-9,80
HGZ1 Kd	0,46	415	18,0	-2,55	0,29	-0,27
HGZ2 Kd	0,36	325	17,7	-1,74	1,47	-1,23
HGZ3 Kd	0,34	305	17,3	-3,09	8,56	-4,09
HGZ4 Kd	0,32	290	17,4	-3,18	15,26	-6,02
HGZ5 Kd	0,29	265	17,3	-4,06	15,41	-6,13
HGZ6 Kd	0,30	268	17,9	-4,29	16,50	-6,13
HOZ1	0,56	500	17,7	-2,99	0,37	-0,31
HOZ2	0,35	315	17,5	-3,42	1,38	-1,36
HOZ3	0,33	295	17,5	-3,60	5,22	-2,34
HOZ4	0,31	280	18,0	-4,29	6,37	-3,31
HOZ5	0,28	255	18,0	-5,16	8,39	-3,91
HOZ6	0,29	258	17,9	-4,69	9,88	-5,19
HOZ1 Kd	0,56	500	17,9	-2,55	0,29	-0,54
HOZ2 Kd	0,35	315	17,8	-3,18	1,15	-2,27
HOZ3 Kd	0,33	295	17,7	-3,36	4,91	-2,86
HOZ4 Kd	0,31	280	18,0	-3,98	4,18	-2,87
HOZ5 Kd	0,28	255	18,0	-5,23	6,26	-3,46
HOZ6 Kd	0,29	258	18,0	-6,49	7,57	-4,62
Mikro1	0,62*	560	17,5	-3,31	1,12	-1,26
Mikro2	0,62*	560	17,5	-3,04	1,43	-1,59
Mikro3	0,62*	560	17,7	-3,27	1,95	-2,25
Mikro4	0,62*	560	17,5	-3,84	2,68	-2,70
Mikro5	0,62*	560	17,9	-7,56	3,54	-3,20
Mikro6	0,62*	560	18,0	-8,21	4,26	-4,15
Mikro1 Kd	0,62*	560	17,6	-3,28	0,95	-1,11
Mikro2 Kd	0,62*	560	17,7	-3,40	1,11	-1,59
Mikro3 Kd	0,62*	560	17,7	-4,23	1,52	-2,03
Mikro4 Kd	0,62*	560	17,9	-4,63	1,94	-2,83
Mikro5 Kd	0,62*	560	17,9	-5,40	2,56	-3,31
Mikro6 Kd	0,62*	560	18,0	-6,28	3,75	-4,29

* Wegen eines bei diesen Mörteln ausgeprägt rheopexen Verhaltens könnte das Ausbreitmaß nicht bestimmt werden. Der W/B-Wert wurde deshalb konstant gehalten.

Tabelle A34: E-Moduln (E_{dyn}) und Biegezugfestigkeiten (β_{BZ}) der Hinterfüllmörtel der Hauptuntersuchungen

Mörtel	E_{dyn}				β_{BZ}		
	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	6 m / N/mm ²	1 a / N/mm ²	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	1 a / N/mm ²
HGZ1	10000	8300	13500	15300	1,03	1,21	1,35
HGZ2	3100	4400	5200	5400	0,86	1,01	1,11
HGZ3	3100	3900	4400	4400	0,42	1,37	1,45
HGZ4	2800	3100	4000	4100	0,48	1,55	1,63
HGZ5	3100	3300	5000	5700	0,54	3,66	3,88
HGZ6	3200	3400	4600	5700	1,31	3,93	4,02
HGZ1 Kd	9000	6800	11000	11400	1,16	1,22	1,53
HGZ2 Kd	2400	2300	3700	4400	0,38	1,11	1,23
HGZ3 Kd	2600	3100	3300	3800	0,52	1,59	1,75
HGZ4 Kd	2200	2200	2300	3400	0,35	1,73	1,86
HGZ5 Kd	2400	2400	2400	3400	0,53	1,74	1,91
HGZ6 Kd	2300	2300	2300	2800	0,54	1,75	1,88
HOZ1	13000	8300	10500	14000	2,76	4,57	4,78
HOZ2	6400	7100	7600	9200	4,25	8,73	9,13
HOZ3	9100	6800	7000	8800	2,84	6,77	7,02
HOZ4	6100	4800	5200	5900	1,54	3,07	3,33
HOZ5	7600	4600	5500	6300	1,87	4,16	4,56
HOZ6	7900	4300	4900	4900	1,44	4,58	4,79
HOZ1 Kd	8100	6400	9800	10800	3,91	3,97	4,09
HOZ2 Kd	8300	3700	5200	6800	3,22	4,96	5,17
HOZ3 Kd	7200	3300	4200	5800	1,60	4,16	4,32
HOZ4 Kd	4700	3500	3800	4300	1,81	3,40	3,56
HOZ5 Kd	5000	3400	3600	5600	2,09	3,55	3,67
HOZ6 Kd	5200	3200	3400	5600	2,21	3,98	4,13
Mikro1	12000	10100	12100	14860	5,12	3,78	5,23
Mikro2	6400	9200	10300	10900	6,46	5,70	6,69
Mikro3	7500	8500	9500	10400	5,84	7,69	8,02
Mikro4	6800	8400	9900	10300	5,27	9,19	9,96
Mikro5	6500	8200	9200	9600	3,74	10,42	10,91
Mikro6	6200	7900	8100	9200	1,04	10,80	11,11
Mikro1 Kd	10500	8800	9800	10800	7,00	2,04	8,10
Mikro2 Kd	5400	7800	9300	9500	6,55	9,44	10,55
Mikro3 Kd	6900	7700	8900	9300	6,61	10,71	11,23
Mikro4 Kd	6200	7200	8700	8900	5,44	9,82	11,25
Mikro5 Kd	5500	6700	8200	8500	5,21	10,20	11,36
Mikro6 Kd	4200	6400	8100	8300	5,21	9,60	11,58

Tabelle A35: Druckfestigkeiten (β_D) und Haftzugfestigkeiten (β_{HZ}) der Hinterfüllmörtel der Hauptuntersuchungen

Mörtel	β_D				β_{HZ} Bruchbild
	7 d / N/mm ²	28 d / N/mm ²	1 a / N/mm ²	28 d / N/mm ²	
HGZ1	19,8	26,2	27,6	0,41	in der Klebeschicht
HGZ2	2,4	3,1	4,7	0,82	Kohäsionsbruch im Mörtel
HGZ3	1,6	4,6	5,7	0,42	Kohäsionsbruch im Mörtel
HGZ4	1,8	5,8	6,3	0,54	Adhäsionsbruch
HGZ5	2,6	11,5	11,6	0,66	Kohäsionsbruch im Mörtel
HGZ6	6,0	12,7	13,1	0,57	Kohäsionsbruch im Mörtel
HGZ1 Kd	14,1	18,4	19,9	0,95	in der Klebeschicht
HGZ2 Kd	1,4	3,6	4,2	0,74	in der Klebeschicht
HGZ3 Kd	1,8	5,2	5,7	0,44	Kohäsionsbruch im Mörtel
HGZ4 Kd	1,4	5,8	6,2	0,42	Kohäsionsbruch im Mörtel
HGZ5 Kd	2,0	5,5	6,1	0,66	Kohäsionsbruch im Mörtel
HGZ6 Kd	2,1	6,4	6,6	0,62	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ1	16,8	22,4	23,5	1,19	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ2	21,0	31,6	43,4	1,18	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ3	16,2	23,8	28,6	1,41	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ4	6,6	10,5	14,6	0,43	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ5	8,1	13,6	15,6	0,41	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ6	8,6	14,1	16,8	0,35	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ1 Kd	11,7	10,2	25,3	1,35	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ2 Kd	10,8	12,8	12,9	1,60	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ3 Kd	5,0	15,5	14,7	1,55	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ4 Kd	6,5	9,9	9,8	0,59	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ5 Kd	8,6	12,8	13,8	0,57	Kohäsionsbruch im Mörtel
HOZ6 Kd	8,9	13,4	14,1	0,51	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro1	55,8	64,8	66,1	0,90	Adhäsionsbruch
Mikro2	40,0	56,4	57,3	0,93	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro3	31,4	50,4	52,0	0,98	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro4	30,0	45,2	46,3	1,01	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro5	30,0	44,3	46,7	1,22	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro6	28,0	43,1	47,0	1,19	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro1 Kd	49,5	57,7	59,0	1,11	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro2 Kd	43,8	47,9	48,5	1,01	Adhäsionsbruch
Mikro3 Kd	35,8	42,2	43,2	1,20	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro4 Kd	34,4	40,8	42,5	1,34	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro5 Kd	34,2	43,0	43,8	1,45	Kohäsionsbruch im Mörtel
Mikro6 Kd	32,8	41,0	44,2	1,46	Kohäsionsbruch im Mörtel

Tabelle A36: Festmörtelrohddichte (ρ_R), Wasserkennwerte; Wasseraufnahmekoeffizient (ω), Wasseraufnahmegrad (w_m) innere Oberfläche (O_i), μ -Werte, der Wärmedehnung (α_T) im Alter von 28 d und Frost-Tauwechsel-Verhalten (FTW) der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 1 Jahr

Mörtel	ρ_R	ω	w_m	O_i	μ -Wert	α_T	α_T	FTW
	/ g/cm ³	/ kg/(m ² ·√h)	/ M.-%	/ m ² /g	/ -	-20 bis +20 °C / 10 ⁻⁶ /K	+20 bis +60 °C / 10 ⁻⁶ /K	
HGZ1	1,74	3,3	14,0	17,6	66	3,4	4,1	OK
HGZ2	1,64	5,1	28,7	14,0	12	3,6	4,4	OK
HGZ3	1,60	10,5	28,4	8,6	16	4,1	5,3	OK
HGZ4	1,56	6,3	28,9	7,3	22	5,0	5,5	OK
HGZ5	1,62	3,5	24,3	8,4	41	5,6	6,3	OK
HGZ6	1,64	2,2	20,4	10,3	38	5,9	6,7	OK
HGZ1 Kd	1,55	1,6	22,0	18,3	48	3,9	4,3	OK
HGZ2 Kd	1,76	8,6	30,9	10,5	10	4,5	4,7	OK
HGZ3 Kd	1,72	7,4	31,4	10,4	13	5,0	6,3	OK
HGZ4 Kd	1,58	5,7	28,5	11,1	17	5,6	6,9	OK
HGZ5 Kd	1,62	3,4	24,6	10,8	24	5,9	7,6	OK
HGZ6 Kd	1,61	2,2	24,1	10,4	30	6,3	7,8	OK
HOZ1	1,51	5,1	21,3	8,9	20	3,0	3,5	OK
HOZ2	1,41	1,6	12,5	4,0	45	3,5	4,1	OK
HOZ3	1,44	1,4	14,4	2,1	24	4,2	4,7	OK
HOZ4	1,42	2,8	17,2	3,9	28	4,5	5,1	OK
HOZ5	1,44	2,7	18,3	4,4	44	5,2	5,8	OK
HOZ6	1,47	1,9	19,4	4,7	55	5,6	6,3	OK
HOZ1 Kd	1,43	3,2	22,6	10,1	20	3,5	3,8	OK
HOZ2 Kd	1,49	1,1	15,3	8,0	31	4,2	4,3	OK
HOZ3 Kd	1,44	1,5	15,7	7,1	18	4,9	5,1	OK
HOZ4 Kd	1,45	2,3	15,8	5,4	21	5,3	5,7	OK
HOZ5 Kd	1,49	1,6	16,2	5,5	31	5,6	6,0	OK
HOZ6 Kd	1,60	0,9	17,1	6,2	35	6,0	7,2	OK
Mikro1	1,74	0,7	5,3	*	145	3,3	3,8	OK
Mikro2	1,69	1,0	6,6	*	133	3,7	4,4	OK
Mikro3	1,63	1,0	7,0	*	100	4,6	5,3	OK
Mikro4	1,57	0,8	7,3	*	115	5,2	5,9	OK
Mikro5	1,58	0,4	7,8	*	125	5,6	6,3	OK
Mikro6	1,56	0,4	5,9	*	137	5,8	6,7	OK
Mikro1 Kd	1,71	0,4	5,3	*	153	3,8	4,1	OK
Mikro2 Kd	1,64	0,7	6,4	*	125	4,6	4,9	OK
Mikro3 Kd	1,59	0,7	7,6	*	115	5,1	5,5	OK
Mikro4 Kd	1,56	0,9	8,4	*	100	5,6	6,0	OK
Mikro5 Kd	1,51	0,5	6,6	*	119	5,9	6,2	OK
Mikro6 Kd	1,51	0,4	6,2	*	126	6,2	6,7	OK

* Proben während der Bestimmung durch Etringitbildung zerstört

Tabelle A37: Wasserabgabeverhalten und Sorptionsfeuchten der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche; anfängliche flächenbezogene Wassermenge der Probe (w_0), Stofffeuchte im Knickpunkt (w_{knicke}), Zeitpunkt des Übergangs zum anderen Trocknungsabschnitt (t_{knicke}), Verhältnis der im 1. Trocknungsabschnitt abgegebenen Wassermenge zum Wassergehalt bei Versuchsbeginn (w_{kn}), Verdunstungsmassenstromdichte (\dot{m}_{knicke}), Wasserabgabegrad nach 24 h (w_{ab24}), absolute Wasserabgabe (w_{ab}), Wasserabgabekoeffizient (w_{ak}), Sorptionsfeuchten bei 53 % (u_{m53}) und 80 % (u_{m80}) rel. Luftfeuchte im Alter von 1 a

Mörtel	w_0	w_{knicke}	t_{knicke}	w_{kn}	\dot{m}_{knicke}	w_{ab24}	w_{ab}	w_{ak}	u_{m53}	u_{m80}
	/ kg/m ²	/ kg/m ²	/ h	/ -	/ kg/(m ² ·h)	/ M.-%	/ M.-%	/ kg/(m ² ·h)	/ M.-%	/ M.-%
HGZ1	10,3	6,6	39,0	0,36	0,095	3,1	13,0	0,10	1,1	4,8
HGZ2	20,0	7,6	61,0	0,62	0,204	7,0	27,9	0,21	0,9	3,9
HGZ3	18,9	7,3	64,0	0,61	0,180	6,5	27,9	0,20	0,8	3,3
HGZ4	19,0	9,0	62,0	0,53	0,162	5,9	28,4	0,18	0,8	3,1
HGZ5	15,8	6,5	60,0	0,59	0,154	5,7	23,8	0,17	0,5	2,0
HGZ6	13,2	5,3	57,0	0,59	0,137	5,1	19,8	0,16	0,5	1,9
HGZ1 Kd	13,5	8,9	47,0	0,34	0,098	3,8	20,9	0,10	0,5	2,5
HGZ2 Kd	18,2	5,9	67,0	0,68	0,184	7,5	30,1	0,19	0,4	1,6
HGZ3 Kd	18,8	7,8	65,0	0,59	0,169	6,8	30,9	0,17	0,5	2,3
HGZ4 Kd	16,6	6,8	64,0	0,59	0,153	6,3	28,1	0,16	0,4	1,9
HGZ5 Kd	14,1	5,2	61,0	0,63	0,146	6,1	24,6	0,16	0,6	2,4
HGZ6 Kd	13,6	5,4	59,0	0,60	0,138	5,9	24,1	0,15	0,6	2,5
HOZ1	13,2	7,1	108	0,53	0,066	3,4	17,4	0,09	1,0	4,1
HOZ2	8,8	2,6	71	0,29	0,036	1,5	7,9	0,04	1,1	4,1
HOZ3	9,8	2,8	63	0,28	0,044	1,8	6,8	0,05	0,7	3,2
HOZ4	11,5	2,9	61	0,25	0,047	3,5	8,7	0,09	0,4	2,5
HOZ5	11,8	3,1	68	0,26	0,045	3,5	9,7	0,10	1,1	4,4
HOZ6	11,9	3,5	68	0,30	0,123	4,2	11,5	0,10	0,1	1,7
HOZ1 Kd	13,3	5,6	78	0,42	0,072	2,1	16,1	0,09	0,6	3,2
HOZ2 Kd	8,9	1,8	50	0,20	0,036	1,0	7,9	0,05	0,6	3,0
HOZ3 Kd	9,2	2,8	52	0,31	0,055	1,8	9,0	0,09	0,7	3,0
HOZ4 Kd	9,0	3,6	40	0,40	0,090	3,2	8,5	0,10	0,5	2,7
HOZ5 Kd	9,2	2,7	44	0,29	0,062	3,5	9,2	0,09	0,6	2,7
HOZ6 Kd	10,0	2,6	39	0,26	0,066	3,6	11,6	0,09	0,6	2,7
Mikro1	3,8	3,4	8,5	0,09	0,041	0,7	1,4	0,02	*	*
Mikro2	4,5	4,3	6,5	0,05	0,035	0,6	1,4	0,02	*	*
Mikro3	5,2	4,8	18,0	0,08	0,031	0,8	1,9	0,02	*	*
Mikro4	4,2	3,8	12,0	0,16	0,060	1,6	2,7	0,04	*	*
Mikro5	3,8	3,3	7,0	0,16	0,087	1,2	2,4	0,03	*	*
Mikro6	4,8	4,3	8,0	0,12	0,071	1,1	2,3	0,03	*	*
Mikro1 Kd	3,8	0,3	11,0	0,07	0,014	0,5	1,2	0,01	*	*
Mikro2 Kd	4,5	0,3	16,0	0,08	0,026	0,5	1,4	0,01	*	*
Mikro3 Kd	5,2	0,4	8,0	0,08	0,058	0,9	2,1	0,02	*	*
Mikro4 Kd	4,5	0,5	8,5	0,12	0,056	1,0	2,3	0,02	*	*
Mikro5 Kd	3,8	0,5	10,0	0,11	0,031	0,9	2,1	0,02	*	*
Mikro6 Kd	4,5	0,5	12,0	0,09	0,039	1,0	2,0	0,03	*	*

* Proben während der Bestimmung durch Ettringitbildung zerstört

Tabelle A38: Sorptionsisothermen der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 1 Jahr

Probe	relative Luftfeuchte								
	/								
	%								
	0	14	30	48	56	67	77	87	95
	Gleichgewichtsfeuchte u _v								
	/								
	Vol.-%								
HGZ1	0,0	0,2	0,4	0,8	1,8	3,2	5,2	8,3	18,0
HGZ2	0,0	0,2	0,3	0,6	1,4	2,4	3,7	5,7	10,7
HGZ3	0,0	0,1	0,2	0,4	0,8	1,4	2,2	3,4	5,2
HGZ4	0,0	0,1	0,2	0,3	0,7	1,2	1,9	3,4	6,5
HGZ5	0,0	0,1	0,2	0,4	0,8	1,4	2,3	3,7	6,9
HGZ6	0,0	0,1	0,2	0,4	1,0	1,7	2,7	4,4	7,3
HGZ1 Kd	0,0	0,2	0,3	0,7	0,8	1,1	1,6	2,8	6,2
HGZ2 Kd	0,0	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,6	1,0	1,7
HGZ3 Kd	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,2	1,9
HGZ4 Kd	0,0	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,6	1,1	2,0
HGZ5 Kd	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,3	2,3
HGZ6 Kd	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,6	3,2
HOZ1	0,0	0,2	0,4	0,8	1,7	2,9	4,6	6,9	12,5
HOZ2	0,0	0,1	0,3	0,5	1,1	2,0	3,3	5,5	10,8
HOZ3	0,0	0,1	0,2	0,5	1,1	1,9	3,2	5,6	11,5
HOZ4	0,0	0,1	0,2	0,5	1,0	1,9	3,1	5,4	10,4
HOZ5	0,0	0,1	0,2	0,5	1,0	1,9	3,1	5,1	9,2
HOZ6	0,0	0,1	0,2	0,4	1,0	1,7	2,8	4,8	9,2
HOZ1 Kd	0,0	0,2	0,4	0,7	0,8	1,2	1,6	2,3	5,2
HOZ2 Kd	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,3	5,5
HOZ3 Kd	0,0	0,1	0,3	0,5	0,6	0,9	1,3	2,3	5,2
HOZ4 Kd	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,8	1,0	1,8	4,0
HOZ5 Kd	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,6	3,7
HOZ6 Kd	0,0	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1,1	1,8	3,9

Tabelle A39: Sorptionsdehnungen (ϵ_m) der Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 1 Jahr

Probe	relative Luftfeuchte / %								
	0	14	30	48	56	67	77	87	95
	Sorptionsdehnung / mm/m								
HGZ1	0,00	0,05	0,13	0,16	0,18	0,20	0,23	0,25	0,28
HGZ2	0,00	0,04	0,09	0,12	0,12	0,14	0,16	0,19	0,24
HGZ3	0,00	0,04	0,10	0,13	0,13	0,17	0,22	0,30	0,57
HGZ4	0,00	0,04	0,10	0,12	0,14	0,19	0,24	0,40	0,88
HGZ5	0,00	0,06	0,15	0,20	0,21	0,24	0,34	0,44	1,49
HGZ6	0,00	0,04	0,13	0,15	0,18	0,22	0,30	0,37	1,61
HGZ1 Kd	0,00	0,05	0,13	0,17	0,18	0,19	0,22	0,25	0,28
HGZ2 Kd	0,00	0,04	0,10	0,11	0,13	0,14	0,18	0,22	0,37
HGZ3 Kd	0,00	0,05	0,11	0,16	0,15	0,19	0,23	0,31	0,58
HGZ4 Kd	0,00	0,05	0,12	0,16	0,16	0,19	0,24	0,32	0,91
HGZ5 Kd	0,00	0,05	0,13	0,18	0,17	0,22	0,28	0,35	1,52
HGZ6 Kd	0,00	0,05	0,14	0,18	0,18	0,23	0,29	0,41	1,69
HOZ1	0,00	0,04	0,08	0,11	0,12	0,13	0,14	0,17	0,20
HOZ2	0,00	0,04	0,10	0,14	0,15	0,18	0,21	0,25	0,32
HOZ3	0,00	0,05	0,11	0,15	0,17	0,20	0,26	0,35	0,81
HOZ4	0,00	0,04	0,11	0,14	0,18	0,19	0,23	0,37	2,07
HOZ5	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,23	0,29	0,43	2,61
HOZ6	0,00	0,07	0,17	0,22	0,24	0,28	0,39	0,66	2,57
HOZ1 Kd	0,00	0,05	0,12	0,17	0,18	0,20	0,22	0,25	0,32
HOZ2 Kd	0,00	0,05	0,12	0,17	0,18	0,21	0,24	0,30	0,44
HOZ3 Kd	0,00	0,05	0,12	0,16	0,17	0,22	0,27	0,34	1,35
HOZ4 Kd	0,00	0,04	0,11	0,15	0,17	0,22	0,29	0,43	2,14
HOZ5 Kd	0,00	0,06	0,14	0,18	0,20	0,25	0,33	0,51	2,41
HOZ6 Kd	0,00	0,07	0,18	0,24	0,25	0,31	0,39	0,59	2,73

Tabelle A40: Ergebnisse der Hg-Druckporosimetrie der Hinterfüllmörtel

Mörtel	Rohdichte	Reindichte	Gesamtporenvol.	Luftporen	Kapillarporen	Gelporen	mittlerer Porenrad.
	/ g/cm ³	/ g/cm ³	/ Vol.-%	/ Vol.-%	/ Vol.-%	/ Vol.-%	/ µm
HGZ1	1,74	2,61	33,3	3,9	16,5	12,9	0,048
HGZ2	1,55	2,51	38,5	5,5	30,2	2,8	0,529
HGZ3	1,57	2,49	37,1	4,4	30,7	1,8	0,465
HGZ4	1,56	2,54	38,9	4,0	30,3	4,6	0,406
HGZ5	1,62	2,42	33,0	4,2	26,5	2,3	0,285
HGZ6	1,64	2,34	29,5	4,3	22,8	2,4	0,208
HGZ1 Kd	1,51	2,54	40,5	5,9	24,5	10,1	0,112
HGZ2 Kd	1,41	2,48	43,2	7,0	35,0	1,2	0,649
HGZ3 Kd	1,44	2,46	41,3	5,9	33,4	2,0	0,501
HGZ4 Kd	1,42	2,38	40,3	6,7	31,7	1,9	0,525
HGZ5 Kd	1,44	2,34	38,4	5,9	30,5	2,0	0,403
HGZ6 Kd	1,47	2,30	36,2	5,9	28,3	2,0	0,372
HOZ1	1,55	2,52	38,5	4,1	29,4	5,0	0,277
HOZ2	1,76	2,57	31,5	4,3	22,1	5,0	0,207
HOZ3	1,72	2,39	28,2	4,1	14,3	9,8	0,097
HOZ4	1,58	2,38	33,5	4,3	26,6	2,6	0,234
HOZ5	1,62	2,36	31,3	4,2	21,9	5,3	0,217
HOZ6	1,61	2,27	28,8	4,0	17,3	7,5	0,240
HOZ1 Kd	1,42	2,23	36,0	5,1	19,0	11,9	0,105
HOZ2 Kd	1,49	2,48	39,9	6,2	28,7	5,0	0,321
HOZ3 Kd	1,54	2,42	36,5	6,3	27,1	3,1	0,281
HOZ4 Kd	1,45	2,37	38,6	6,4	29,8	2,4	0,311
HOZ5 Kd	1,49	2,36	36,9	5,9	27,5	3,5	0,238
HOZ6 Kd	1,60	2,29	30,0	4,3	17,5	8,2	0,235
Mikro1	1,53	2,27	32,6	3,9	12,0	16,7	0,028
Mikro2	1,51	2,17	30,6	3,4	10,1	17,1	0,026
Mikro3	1,50	2,19	31,5	4,3	13,3	13,9	0,040
Mikro4	1,50	2,15	30,2	4,0	6,8	19,4	0,019
Mikro5	1,48	2,11	30,0	3,8	6,7	19,5	0,017
Mikro6	1,48	2,09	29,3	4,6	10,8	13,9	0,042
Mikro1 Kd	1,49	2,21	32,3	4,1	7,8	20,4	0,017
Mikro2 Kd	1,48	2,18	31,6	3,7	10,7	17,2	0,025
Mikro3 Kd	1,47	2,16	31,8	4,3	10,1	17,4	0,029
Mikro4 Kd	1,43	2,10	32,3	4,8	6,9	20,6	0,033
Mikro5 Kd	1,42	2,06	31,1	4,7	9,4	17,0	0,033
Mikro6 Kd	1,41	1,99	29,0	4,2	11,3	13,5	0,029

Luftporen > 10 µm

Kapillarporen 10 µm-30 nm

Gelporen < 30 nm

Einteilung der Poren nach Smolcyk

Tabelle A41: Ausblühverhalten des Hinterfüllmörtel der Hauptversuche im Alter von 28 Tagen

Mörtel	Zyklus	Ausblühung	
		CaCO ₃	CaSO ₄ ·2H ₂ O
HGZ1	-	keine	keine
HGZ2	-	keine	keine
HGZ3	-	keine	keine
HGZ4	-	keine	keine
HGZ5	-	keine	keine
HGZ6	-	keine	keine
HGZ1 Kd	-	keine	keine
HGZ2 Kd	-	keine	keine
HGZ3 Kd	-	keine	keine
HGZ4 Kd	-	keine	keine
HGZ5 Kd	-	keine	keine
HGZ6 Kd	-	keine	keine
HOZ1	-	keine	keine
HOZ2	-	keine	keine
HOZ3	-	keine	keine
HOZ4	-	keine	keine
HOZ5	-	keine	keine
HOZ6	-	keine	keine
HOZ1 Kd	-	keine	keine
HOZ2 Kd	-	keine	keine
HOZ3 Kd	-	keine	keine
HOZ4 Kd	-	keine	keine
HOZ5 Kd	-	keine	keine
HOZ6 Kd	-	keine	keine
Mikro1	-	keine	keine
Mikro2	4	-	+++ Alkalisulfate
Mikro3	4	-	++ Alkalisulfate
Mikro4	4	-	++ Alkalisulfate
Mikro5	3	-	+ Alkalisulfate
Mikro6	3	-	+ Alkalisulfate
Mikro1 Kd	-	keine	keine
Mikro2 Kd	-	keine	keine
Mikro3 Kd	-	keine	keine
Mikro4 Kd	-	keine	keine
Mikro5 Kd	-	keine	keine
Mikro6 Kd	-	keine	keine

+ kaum erkennbar

++ gut erkennbar

+++ dicke Krusten

Tabelle A42: Korngrößenverteilung und Körnungsziffern (k' -Wert) der SOLL-Sieblinien L-SOLL (Mittelwert der historischen Mörtel der Torhalle in Lorsch) und S-SOLL (Mittelwert der historischen Mörtel der Einhardbasilika in Steinbach) sowie der IST-Sieblinien L-IST und S-IST und der Sande aus denen die IST-Sieblinien aufgebaut sind. Abgegeben ist auch der mengenmäßige Anteil dieser Sande an der SOLL-Sieblinie S-IST

Probe	<0,063 mm / M.-% M.- %	0,063 mm / M.- % M.- %	0,125 mm / M.- % M.- %	0,25 mm / M.- % M.- %	0,5 mm / M.- % M.- %	1,0 mm / M.- % M.- %	2,0 mm / M.- % M.- %	4,0 mm / M.- % M.- %	k' -Wert / -	Anteil M.-% M.- %
L1	0,24	0,55	6,22	33,81	42,6 3	13,55	2,89	0,10	3,71	*
L2	0,02	0,12	38,09	59,64	2,10	0,02	0,00	0,00	2,64	*
L3	48,39	50,60	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*
L4	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*
L-SOLL	1,36	6,49	36,70	44,97	8,65	1,65	0,18	0,00	2,59	-
L-IST	1,36	6,49	36,70	44,97	8,65	1,65	0,18	0,00	0,00	-
G32	1,2	6,8	38,1	41,7	9,1	2,8	0,3	0,0	2,60	33
W3	1,6	7,6	40,9	40,7	7,6	1,5	0,1	0,0	2,50	33
Q3	1,3	7,2	38,8	41,2	9,1	2,2	0,2	0,0	2,57	22
Q4	1,0	5,6	36,8	47,8	7,6	1,0	0,2	0,0	2,59	9
Q5	2,2	7,0	36,6	45,2	7,3	1,3	0,4	0,0	2,54	3
S-SOLL	12,3	11,6	27,1	27,9	15,6	2,6	1,2	1,7	2,44	
S-IST	12,9	10,0	27,2	29,0	15,1	2,8	3,1	0,0	2,44	

* Zur Zusammensetzung der IST-Sieblinie L-IST wurden die abgesiebten Einzelfraktionen der Sande L1, L2, L3, L4 entsprechend der Soll-Sieblinie abgewogen. Dabei kam die Körnung 0,063-0,125 mm aus L3 und die Körnung < 0,063 mm aus L4

Tabelle A43: Zusammensetzung der Kalkputze sowie deren Frischmörteleigenschaften

Mörtel	Bindemittel	B/Z _{CaO} / GT	B/Z _{Ca(OH)₂} / GT	Zuschlag / -	Fließ- mittel	F10* / M.-%	AM / -
L1	CL90/1	1:3,5	1:2,65	L-IST	-	0,0	12,0
L2	CL90/1	1:4,5	1:3,41	L-IST	-	0,0	11,0
S1	CL90/2	1:1,85	1:1,40	S-IST	-	0,0	13,0
S2	CL90/2	1:2,35	1:1,78	S-IST	-	0,0	13,4
S3	CL90/2	1:2,85	1:2,16	S-IST	-	0,0	13,3
S4	CL90/2	1:3,35	1:2,54	S-IST	-	0,0	12,8
S5	CL90/2	1:3,85	1:2,91	S-IST	-	0,0	13,3
B1	CL90/3	1:1,85	1:1,40	S-IST	-	0,0	12,0
B2	CL90/3	1:1,85	1:1,40	S-IST	-	0,0	14,0
B3	CL90/3	1:1,85	1:1,40	S-IST	-	0,0	17,0
B4	CL90/3	1:2,85	1:2,16	S-IST	-	0,0	12,0
B5	CL90/3	1:2,85	1:2,16	S-IST	-	0,0	14,0
B6	CL90/3	1:2,85	1:2,16	S-IST	-	0,0	17,0
B7	CL90/3	1:3,85	1:2,91	S-IST	-	0,0	12,0
B8	CL90/3	1:3,85	1:2,91	S-IST	-	0,0	14,0
B9	CL90/3	1:3,85	1:2,91	S-IST	-	0,0	17,0
K1	WKH	1:1,85	1:1,40	S-IST	-	0,0	12,0
K+1	WKH	1:1,85	1:1,40	S-IST	F10	1,0	12,0
K2	WKH	1:1,85	1:1,40	S-IST	-	0,0	17,0
K+2	WKH	1:1,85	1:1,40	S-IST	F10	1,0	17,0
K3	WKH	1:2,85	1:2,16	S-IST	-	0,0	12,0
K+3	WKH	1:2,85	1:2,16	S-IST	F10	1,0	12,0
K4	WKH	1:2,85	1:2,16	S-IST	-	0,0	17,0
K+4	WKH	1:2,85	1:2,16	S-IST	F10	1,0	17,0
K5	WKH	1:3,85	1:2,91	S-IST	-	0,0	12,0
K+5	WKH	1:3,85	1:2,91	S-IST	F10	1,0	12,0
K6	WKH	1:3,85	1:2,91	S-IST	-	0,0	17,0
K+6	WKH	1:3,85	1:2,91	S-IST	F10	1,0	17,0

* Die Fließmittelzugabe erfolgte bezogen auf das Bindemittel

Tabelle A44: Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis (B/Z), Wasseranspruch (WA), Wasser/Bindemittel-Wert (W/B), Frischmörtel- (ρ_f) und Festmörtelrohddichte nach 28 d (ρ_{l28}) bei Lagerung a und nach vollständiger Carbonatisierung (ρ_{lc}) nach Lagerung c, sowie die hygrischen Längenänderungen, d. h. das Schwinden in der Form (ϵ_f), das 1. Schwinden (ϵ_{s1}), das Quellen (ϵ_q) und das Schwinden (ϵ_{s2}) der untersuchten Kalkputze

Proben	B/Z	WA	W/B	ρ_f	ρ_{l28}	ρ_{lc}	hygrische Längenänderungen			
	/ GT	/ M.-%	/ -	/ g/cm ³	/ g/cm ³	/ g/cm ³	ϵ_{sF} / mm/m	ϵ_{s1} / mm/m	ϵ_q / mm/m	ϵ_{s2} / mm/m
L1	1:3,5	21,8	0,98	1,82	1,64	1,65	-15,1	-0,76	0,17	-0,09
L2	1:4,5	18,9	1,04	1,91	1,67	1,70	-13,5	-0,13	0,13	-0,06
S1	1:1,85	19,3	0,55	1,91	1,65	1,80	-13,2	-0,20	0,13	-0,10
S2	1:2,35	18,5	0,62	1,95	1,65	1,80	-10,5	-0,17	0,11	-0,09
S3	1:2,85	18,4	0,71	2,00	1,70	1,83	-11,5	-0,16	0,12	-0,11
S4	1:3,35	17,5	0,76	1,97	1,72	1,84	-9,7	-0,17	0,11	-0,09
S5	1:3,85	18,1	0,88	2,05	1,74	1,86	-9,7	-0,22	0,07	-0,06
B1	1:1,85	22,8	0,65	1,76	1,58	1,71	-8,1	-0,01	0,06	-0,06
B2	1:1,85	26,0	0,74	1,85	1,52	1,80	-18,5	-0,05	0,03	-0,03
B3	1:1,85	28,1	0,80	1,83	1,50	1,77	-12,2	-0,05	0,05	-0,02
B4	1:2,85	20,3	0,78	1,95	1,64	1,88	-6,5	-0,01	0,03	-0,02
B5	1:2,85	20,8	0,80	1,93	1,63	1,90	-15,2	-0,04	0,03	-0,02
B6	1:2,85	23,1	0,89	1,93	1,59	1,86	-13,9	-0,04	0,02	-0,02
B7	1:3,85	18,4	0,89	2,02	1,67	1,98	-9,1	-0,08	0,04	-0,06
B8	1:3,85	19,6	0,95	2,01	1,68	1,91	-15,1	-0,07	0,03	-0,03
B9	1:3,85	20,4	0,99	1,96	1,65	1,87	-13,5	-0,06	0,02	-0,04
K1	1:1,85	23,2	0,66	1,82	1,47	1,75	-28,8	-0,20	0,06	-0,06
K+1	1:1,85	20,4	0,58	1,86	1,54	1,84	-23,5	-0,17	0,11	-0,11
K2	1:1,85	27,0	0,77	1,81	1,38	1,72	-31,0	-0,25	0,04	-0,04
K+2	1:1,85	23,9	0,68	1,86	1,48	1,78	-26,3	-0,11	0,14	-0,13
K3	1:2,85	17,9	0,69	1,81	1,60	1,78	-21,5	-0,06	0,04	-0,03
K+3	1:2,85	16,9	0,65	1,91	1,65	1,93	-22,0	-0,12	0,09	-0,08
K4	1:2,85	21,8	0,84	1,88	1,53	1,77	-24,8	-0,12	0,03	-0,02
K+4	1:2,85	19,0	0,73	1,83	1,60	1,83	-28,4	-0,17	0,04	-0,03
K5	1:3,85	15,9	0,77	1,98	1,66	1,88	-15,0	-0,05	0,02	-0,03
K+5	1:3,85	14,6	0,71	2,01	1,72	1,94	-28,2	-0,07	0,02	-0,02
K6	1:3,85	19,2	0,93	1,95	1,59	1,81	-21,9	-0,07	0,04	-0,03
K+6	1:3,85	16,5	0,80	2,03	1,67	1,91	-6,4	-0,07	0,03	-0,03

Tabelle A45: Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen der Kalkputze; dynamischer E-Modul (E_{dyn}), Biegezugfestigkeit (β_{BZ}) und Druckfestigkeit (β_{D})

Mörtel	E_{dyn}			β_{BZ}			β_{D}				
	28 d	90 d	1 a	28	90 d	1 a	28 d	90 d	1 a	1a* vor Ort	
	/ N/mm ²										
L1	3300	6300	6700	0,49	1,58	1,75	0,8	3,1	3,7	-	
L2	3200	6900	7500	0,47	1,62	1,78	1,0	3,7	4,5	-	
S1	5900	14600	18900	0,67	2,38	3,04	2,1	9,2	14,1	4,2	
S2	5400	15800	18100	0,59	2,45	2,78	1,7	10,2	12,9	5,5	
S3	5700	15400	17900	0,59	1,40	2,67	1,8	9,7	12,9	7,8	
S4	5400	15800	17700	0,32	2,14	2,93	1,5	9,2	11,1	11,0	
S5	5300	15400	15900	0,50	2,51	2,91	1,5	9,1	9,8	11,2	
B1	4200	8300	-	0,56	1,69	-	2,1	4,1	-	-	
B2	5100	11300	-	0,62	1,57	-	2,1	7,2	-	-	
B3	4800	10500	-	0,66	1,31	-	1,9	5,3	-	-	
B4	4000	12400	-	0,28	1,45	-	1,6	6,2	-	-	
B5	5100	12400	-	0,58	1,35	-	2,0	5,7	-	-	
B6	5000	11600	-	0,81	1,33	-	1,9	6,5	-	-	
B7	2900	13800	-	0,20	1,55	-	1,2	7,7	-	-	
B8	5200	13100	-	0,55	1,31	-	1,8	7,0	-	-	
B9	5300	11600	-	0,68	1,05	-	1,6	5,3	-	-	
K1	5000	8800	-	0,64	1,28	-	3,1	4,9	-	-	
K+1	7200	13100	-	1,08	2,64	-	4,1	10,4	-	-	
K2	3800	9100	-	0,71	1,48	-	1,6	5,5	-	-	
K+2	6100	11500	-	0,70	2,61	-	3,0	6,9	-	-	
K3	5200	9400	-	0,69	1,18	-	2,5	4,5	-	-	
K+3	6500	13700	-	0,48	2,40	-	3,6	13,6	-	-	
K4	4000	10000	-	0,48	1,17	-	1,5	5,5	-	-	
K+4	6400	13200	-	0,81	2,51	-	1,3	8,6	-	-	
K5	5300	10100	-	0,63	0,92	-	2,1	3,8	-	-	
K+5	7300	15000	-	0,57	2,53	-	2,7	12,2	-	-	
K6	4300	9000	-	0,34	0,91	-	1,3	4,2	-	-	
K+6	6300	13300	-	0,60	2,17	-	1,8	9,6	-	-	

* Druckfestigkeit 1 Jahr nach der Applikation in der Einhardbasilika in Steinbach/Hessen

Tabelle A46: Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen der Kalkputze; Zugfestigkeit (β_Z), Haftzugfestigkeit (β_{HZ})

Mörtel	β_Z			β_{HZ}
	28 d / N/mm ²	90 d / N/mm ²	1 a / N/mm ²	28 / N/mm ²
L1	0,05	0,06	0,08	0,03
L2	0,04	0,05	0,06	0,04
S1	0,37	0,65	0,66	0,11
S2	0,40	0,71	0,67	0,09
S3	0,36	0,51	0,53	0,12
S4	0,35	0,59	0,61	0,15
S5	0,36	0,53	0,55	0,16
B1	0,09	0,28	-	-
B2	0,10	0,28	-	-
B3	0,08	0,15	-	-
B4	0,03	0,21	-	-
B5	0,08	0,25	-	-
B6	0,09	0,23	-	-
B7	0,03	0,19	-	-
B8	0,11	0,20	-	-
B9	0,09	0,11	-	-
K1	0,09	0,20	-	-
K+1	0,13	0,25	-	-
K2	0,06	0,20	-	-
K+2	0,11	0,23	-	-
K3	0,06	0,17	-	-
K+3	0,13	0,25	-	-
K4	0,04	0,18	-	-
K+4	0,10	0,25	-	-
K5	0,07	0,16	-	-
K+5	0,11	0,24	-	-
K6	0,06	0,16	-	-
K+6	0,09	0,19	-	-

- nicht bestimmt

Tabelle A47: Hygrische Eigenschaften der Kalkputze im Alter von 28 Tagen; Wasseraufnahmekoeffizient (ω), Wasseraufnahmegrad nach 24 h (w_{m24}), absoluter Wasseraufnahmegrad (w_m), Sorptionsfeuchte bei 53 % (u_{m53}) und 80 % (u_{m80}) rel. Luftfeuchte, innere Oberfläche nach BET (O_i) und μ -Wert

Mörtel	ω	w_{m24}	w_m	u_{m53}	u_{m80}	O_i	μ -Wert
	/ kg/(m ² ·√h)	/ M.-%	/ M.-%	/ M.-%	/ M.-%	/ m ² /g	/ -
L1	20,1	13,8	14,6	0,17	0,20	3,1	11
L2	17,2	12,4	13,0	0,19	0,20	3,4	11
S1	6,9	13,9	14,6	0,20	0,28	3,6	20
S2	5,2	13,5	14,3	0,19	0,29	3,4	19
S3	7,6	12,8	13,5	0,18	0,30	3,3	20
S4	5,8	12,2	12,9	0,23	0,36	4,2	20
S5	7,4	12,7	13,5	0,22	0,35	4,0	20
B1	8,6	18,4	19,9	2,02	-	36,6*	14
B2	8,9	18,7	20,4	1,84	-	33,2*	12
B3	13,1	19,8	21,4	1,08	-	19,5*	10
B4	11,5	17,8	20,5	1,60	-	29,0*	13
B5	8,2	15,6	17,0	1,28	-	23,2*	14
B6	11,5	16,7	18,2	1,49	-	27,0*	12
B7	13,5	16,8	18,9	1,21	-	21,9*	11
B8	9,4	16,1	16,2	1,14	-	20,6*	13
B9	8,7	14,1	17,9	1,09	-	19,8*	13
K1	6,1	18,3	20,8	1,75	-	31,7*	10
K+1	8,5	17,5	19,2	1,58	-	28,6*	11
K2	12,8	22,2	24,3	1,97	-	35,7*	8
K+2	12,4	20,9	22,2	2,46	-	44,6*	9
K3	6,0	15,2	18,1	1,24	-	22,3*	12
K+3	9,1	15,2	16,9	1,82	-	32,8*	14
K4	12,2	18,8	20,9	1,68	-	30,4*	16
K+4	11,6	16,9	18,5	1,60	-	28,9*	17
K5	5,6	14,7	17,3	1,24	-	22,4*	10
K+5	7,6	13,6	15,5	1,03	-	18,7*	15
K6	11,3	16,6	18,9	1,02	-	18,5*	9
K+6	11,1	14,9	16,6	1,25	-	22,5*	14

* Ergebnis durch Carbonatisierung verfälscht

Tabelle A48: Hygrische Eigenschaften, thermische Dehnung und Frost-Tauwechsel-Verhalten der Kalkputze im Alter von 90 Tagen; Wasseraufnahmekoeffizient (ω), Wasseraufnahmegrad nach 24 h (w_{m24}), absoluter Wasseraufnahmegrad (w_m), innere Oberfläche nach BET (O_i), μ -Wert, thermische Dehnung (α_T), Sorptionsfeuchte bei 53 % (u_{m53}) und 80 % (u_{m80}) rel. Luftfeuchte und Frost-Tauwechsel-Widerstand (FTW) nach 45 Zyklen

Mörtel	ω / kg/(m ² ·√h)	w_{m24} / M.-%	w_m / M.-%	O_i / m ² /g	μ -Wert / -	α_{T1} / 10 ⁻⁶ /K	α_{T2} / 10 ⁻⁶ /K	u_{m53} / M.-%	u_{m80} / M.-%	FTW
L1	15,7	10,8	11,6	4,0	11	10,0	9,1	0,22	0,28	OK ^{1*}
L2	14,3	10,5	11,4	3,8	11	9,9	10,3	0,21	0,27	OK ^{1*}
S1	2,5	10,0	11,0	7,8	23	9,0	10,5	0,43	0,52	OK ^{1*}
S2	1,8	9,5	10,8	7,1	21	9,4	10,7	0,39	0,48	OK ^{1*}
S3	1,8	8,8	10,5	7,8	20	9,0	10,5	0,43	0,56	OK ^{1*}
S4	1,6	5,8	9,9	7,1	21	9,3	10,5	0,39	0,49	OK ^{1*}
S5	1,7	9,3	11,0	7,1	19	6,1	7,1	0,39	0,47	OK ^{1*}
B1	2,6	15,3	20,3	5,1	13	-	-	0,28	0,59	A ²
B2	5,0	15,8	17,4	5,6	14	-	-	0,31	0,59	A ²
B3	10,8	16,2	18,4	6,8	13	-	-	0,38	0,71	A ²
B4	6,1	13,2	15,2	4,1	14	-	-	0,23	0,44	A ²
B5	5,1	13,8	15,2	1,2	10	-	-	0,07	0,15	A ²
B6	8,6	13,9	15,6	4,1	12	-	-	0,23	0,49	OK ¹
B7	5,7	12,5	14,3	0,9	16	-	-	0,05	0,11	OK ¹
B8	5,9	12,2	14,6	3,5	13	-	-	0,19	0,33	OK ¹
B9	5,7	12,4	15,4	5,6	14	-	-	0,31	0,56	OK ¹
K1	5,6	14,9	17,6	6,2	11	-	-	0,34	0,55	A ²
K+1	6,2	15,1	17,2	5,0	15	-	-	0,28	0,56	OK ¹
K2	8,2	18,1	20,5	4,9	9	-	-	0,27	0,59	A ²
K+2	6,1	16,9	19,1	6,5	11	-	-	0,36	0,68	R ³
K3	6,3	13,5	16,8	4,2	11	-	-	0,23	0,47	A ²
K+3	4,2	10,9	15,0	4,2	14	-	-	0,23	0,46	OK ¹
K4	10,9	15,8	18,3	5,5	10	-	-	0,31	0,60	A ²
K+4	11,5	14,4	16,4	5,0	13	-	-	0,27	0,51	R ³
K5	7,4	12,4	15,5	5,6	12	-	-	0,31	0,56	A ²
K+5	6,2	11,1	13,9	5,6	15	-	-	0,31	0,35	OK ¹
K6	11,0	14,3	17,1	3,1	10	-	-	0,17	0,36	A ²
K+6	7,6	12,3	14,9	3,8	13	-	-	0,21	0,43	OK ¹

α_{T1} Temperaturbereich von -20 bis +20 °C

α_{T2} Temperaturbereich von +20 bis +60 °C

* nur 15 FTW-Zyklen

¹ erfüllt Anforderungen nach KNÖFEL 1993 an Putzmörtel, d. h. keine oder nur geringe Absplitterungen, keine bzw. keine größeren Risse

² Absplitterungen

³ Risse

Tabelle A49: Wasserabgabeverhalten der Kalkputze im Alter von 28 Tagen; anfängliche flächenbezogene Wassermenge der Probe (w_0), Stofffeuchte im Knickpunkt (w_{knick}), Zeitpunkt des Übergangs zum anderen Trocknungsabschnitt (t_{knick}), Verhältnis der im 1. Trocknungsabschnitt abgegebenen Wassermenge zum Wassergehalt bei Versuchsbeginn (w_{kn}), Verdunstungsmassenstromdichte (\dot{m}_{knick2}), Wasserabgabegrad nach 24 h (w_{ab24}), absolute Wasserabgabe (w_{ab}), Wasserabgabekoeffizient (w_{ak})

Mörtel	w_0 / kg/m ²	w_{knick} / kg/m ²	t_{knick} / h	w_{kn} / -	\dot{m}_{knick2} / kg/(m ² ·h)	w_{ab24} / M.-%	w_{ab} / M.-%	w_{ak} / kg/(m ² ·h)
S1	9,7	7,5	75,0	0,23	0,029	1,6	14,2	0,046
S2	9,6	9,4	74,0	0,23	0,028	1,4	14,0	0,039
S3	9,2	9,2	76,0	0,22	0,026	1,3	13,1	0,038
S4	9,0	9,0	67,5	0,18	0,024	1,2	12,5	0,035
S5	9,2	9,2	70,5	0,06	0,008	0,9	13,0	0,026
B1	13,1	12,8	10,3	0,03	0,032	0,8	19,4	0,023
B2	12,7	12,6	12,6	0,01	0,017	0,4	16,3	0,010
B3	13,3	12,7	10,3	0,05	0,065	1,2	20,8	0,032
B4	13,2	10,8	26,0	0,18	0,090	3,6	20,1	0,095
B5	11,5	11,1	30,0	0,06	0,023	2,1	16,2	0,058
B6	12,1	11,2	26,7	0,06	0,028	1,0	16,2	0,029
B7	12,5	9,9	40,0	0,21	0,066	3,3	18,1	0,091
B8	12,2	11,6	12,3	0,05	0,051	0,4	16,7	0,012
B9	11,0	10,7	9,0	0,04	0,029	0,8	16,5	0,023
K1	12,9	12,0	22,0	0,07	0,040	1,5	20,5	0,038
K+1	12,3	10,9	34,0	0,11	0,041	1,7	19,1	0,046
K2	14,6	13,8	25,3	0,03	0,052	1,2	24,0	0,031
K+2	13,6	12,3	28,3	0,10	0,046	1,8	22,3	0,049
K3	12,0	11,4	15,7	0,03	0,021	1,2	17,9	0,031
K+3	11,5	10,6	21,3	0,08	0,042	1,4	16,6	0,036
K4	13,4	12,4	19,0	0,06	0,041	1,4	20,6	0,040
K+4	12,3	11,1	24,7	0,10	0,048	1,7	18,2	0,046
K5	11,7	11,2	18,7	0,04	0,025	0,8	16,3	0,021
K+5	10,8	9,7	23,7	0,10	0,045	1,5	15,2	0,040
K6	12,7	12,2	15,5	0,04	0,032	1,0	18,7	0,022
K+6	11,4	9,6	37	0,15	0,047	2,0	16,3	0,053

Tabelle A50: Wasserabgabeverhalten der Kalkputze im Alter von 90 Tagen; anfängliche flächenbezogene Wassermenge der Probe (w_0), Stofffeuchte im Knickpunkt (w_{knick}), Zeitpunkt des Übergangs zum anderen Trocknungsabschnitt (t_{knick}), Verhältnis der im 1. Trocknungsabschnitt abgegebenen Wassermenge zum Wassergehalt bei Versuchsbeginn (w_{kn}), Verdunstungsmassenstromdichte ($\dot{m}_{\text{knick}2}$), Wasserabgabegrad nach 24 h ($w_{\text{ab}24}$), absolute Wasserabgabe (w_{ab}), Wasserabgabekoeffizient (w_{ak})

Mörtel	w_0 / kg/m ²	w_{knick} / kg/m ²	t_{knick} / h	w_{kn} / -	$\dot{m}_{\text{knick}2}$ / kg/(m ² ·h)	$w_{\text{ab}24}$ / M.-%	w_{ab} / M.-%	w_{ak} / kg/(m ² ·h)
S1	8,6	5,2	69,0	0,40	0,050	2,4	10,8	0,068
S2	7,6	6,3	67,0	0,38	0,049	2,1	10,5	0,061
S3	7,6	4,0	69,0	0,47	0,052	1,9	10,3	0,056
S4	6,9	5,3	58,0	0,23	0,027	1,1	9,2	0,033
S5	8,1	6,7	63,5	0,18	0,023	1,0	10,7	0,031
B1	12,8	11,9	16,0	0,07	0,058	2,0	19,7	0,052
B2	11,7	11,0	6,0	0,05	0,107	3,2	17,0	0,086
B3	12,1	11,2	13,0	0,21	0,068	2,0	18,1	0,055
B4	11,0	10,3	6,0	0,06	0,111	3,2	15,3	0,092
B5	10,8	10,3	4,0	0,05	0,134	3,9	14,8	0,112
B6	10,8	10,0	8,0	0,07	0,097	2,8	14,9	0,083
B7	10,6	3,0	93,0	0,71	0,082	3,4	12,9	0,106
B8	10,7	2,3	110,0	0,79	0,077	3,0	14,4	0,092
B9	11,1	3,0	95,3	0,73	0,085	3,6	15,2	0,113
K1	12,0	3,9	105,0	0,68	0,077	3,6	17,4	0,102
K+1	11,8	6,3	42,0	0,47	0,132	5,4	17,6	0,150
K2	13,3	3,7	137,0	0,72	0,071	3,2	20,1	0,092
K+2	12,8	5,6	93,3	0,57	0,078	3,6	18,5	0,108
K3	11,8	4,5	42,7	0,62	0,171	8,4	16,2	0,248
K+3	10,9	5,4	104,0	0,51	0,053	2,4	14,5	0,070
K4	12,5	4,4	41,5	0,65	0,195	9,3	17,9	0,278
K+4	11,7	4,1	107,7	0,65	0,070	2,9	16,0	0,086
K5	11,3	4,0	41,0	0,65	0,178	8,1	14,9	0,234
K+5	10,3	4,0	97,3	0,61	0,065	2,7	13,5	0,079
K6	12,0	3,1	39,7	0,69	0,208	9,6	16,7	0,285
K+6	11,1	3,7	104,0	0,67	0,071	2,9	14,6	0,087

Tabelle A51: Sorptionsisothermen der Kalkputze, Beginn der Messung im Alter von 28 Tagen

Probe	relative Luftfeuchte / %							
	0	14	30	48	56	67	77	95
	Gleichgewichtsfeuchte u_v / Vol.-%							
B1	0,00	0,05	0,74	2,50	3,62	4,50	6,56	12,31
B2	0,00	0,06	0,62	2,14	3,18	4,03	6,06	11,32
B3	0,00	0,03	0,38	1,23	1,85	2,76	5,06	9,60
B4	0,00	0,03	0,30	1,92	3,05	4,05	6,26	11,58
B5	0,00	0,07	0,46	1,60	2,38	3,11	4,94	9,71
B6	0,00	0,06	0,48	1,80	2,72	3,51	5,36	9,27
B7	0,00	0,05	0,33	1,52	2,32	3,12	5,24	9,62
B8	0,00	0,05	0,44	1,48	2,17	2,84	4,59	8,53
B9	0,00	0,05	0,41	1,37	2,06	2,67	4,22	7,69
K1	0,00	0,07	0,78	2,01	2,91	3,53	5,16	10,57
K+1	0,00	0,03	0,72	1,89	2,76	3,42	5,34	10,98
K2	0,00	0,07	0,79	2,14	3,10	3,78	5,69	10,47
K+2	1,00	0,12	0,96	2,92	4,08	4,69	6,63	12,28
K3	2,00	0,05	0,57	1,52	2,21	2,81	4,46	9,04
K+3	3,00	0,12	0,86	2,38	3,37	3,93	5,49	10,33
K4	4,00	0,08	0,78	1,42	3,26	3,84	5,51	9,75
K+4	5,00	0,05	0,61	1,98	2,90	3,39	5,20	9,76
K5	6,00	0,08	0,60	1,61	2,32	2,84	4,20	8,12
K+5	7,00	0,05	0,52	1,38	2,01	2,55	4,08	7,53
K6	8,00	0,02	0,46	1,26	1,84	2,46	3,98	7,65
K+6	9,00	0,07	0,60	1,62	2,35	2,84	4,44	8,23

Tabelle A52: Sorptionsdehnungen (ϵ_u) der Kalkputze, Beginn der Messung im Alter von 28 Tagen

Probe	relative Luftfeuchte / %							
	0	14	30	48	56	67	77	95
	Sorptionsdehnung ϵ_u / mm/m							
B1	0,00	-0,01	-0,05	-0,08	-0,08	-0,10	-0,12	-0,09
B2	0,00	-0,01	-0,03	-0,03	-0,07	-0,09	-0,09	-0,05
B3	0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,02	-0,04	-0,04	-0,03
B4	0,00	-0,01	-0,06	-0,07	-0,11	-0,15	-0,13	-0,13
B5	0,00	-0,01	-0,04	-0,03	-0,05	-0,07	-0,07	-0,04
B6	0,00	-0,01	-0,03	-0,06	-0,07	-0,11	-0,11	-0,09
B7	0,00	-0,01	-0,03	-0,04	-0,04	-0,09	-0,09	-0,05
B8	0,00	-0,01	-0,02	-0,06	-0,04	-0,06	-0,06	-0,02
B9	0,00	-0,01	-0,03	-0,02	-0,05	-0,06	-0,06	-0,03
K1	0,00	-0,01	-0,09	-0,06	-0,08	-0,07	-0,08	-0,06
K+1	0,00	-0,01	-0,10	-0,06	-0,06	-0,07	-0,07	-0,06
K2	0,00	-0,01	-0,09	-0,12	-0,11	-0,07	-0,11	-0,11
K+2	0,00	-0,01	-0,08	-0,05	-0,08	-0,11	-0,08	-0,03
K3	0,00	-0,01	-0,07	-0,06	-0,08	-0,09	-0,08	-0,06
K+3	0,00	-0,01	-0,09	-0,08	-0,11	-0,19	-0,14	-0,11
K4	0,00	-0,01	-0,09	-0,10	-0,13	-0,14	-0,15	-0,13
K+4	0,00	-0,01	-0,06	-0,02	-0,07	-0,07	-0,08	-0,05
K5	0,00	-0,01	-0,09	-0,06	-0,10	-0,09	-0,07	-0,06
K+5	0,00	-0,01	-0,06	-0,02	-0,05	-0,05	-0,09	-0,05
K6	0,00	-0,01	-0,05	-0,02	-0,06	-0,04	-0,10	-0,06
K+6	0,00	-0,01	-0,04	-0,01	-0,04	-0,06	-0,06	-0,05

Tabelle A53: Sorptionsisothermen der Kalkputze, Beginn der Messung im Alter von 90 Tagen

Probe	relative Luftfeuchte / %							
	0	14	30	48	56	67	77	95
	Gleichgewichtsfeuchte u_v / Vol.-%							
B1	0,00	0,09	0,19	0,41	0,53	0,74	0,94	5,32
B2	0,00	0,09	0,23	0,47	0,61	0,77	0,99	4,90
B3	0,00	0,09	0,23	0,57	0,73	0,89	1,17	4,16
B4	0,00	0,06	0,15	0,36	0,47	0,58	0,77	3,68
B5	0,00	0,02	0,06	0,11	0,13	0,19	0,27	2,93
B6	0,00	0,06	0,15	0,35	0,47	0,60	0,84	2,19
B7	0,00	0,02	0,06	0,10	0,10	0,14	0,20	2,79
B8	0,00	0,04	0,13	0,31	0,40	0,48	0,59	2,79
B9	0,00	0,07	0,21	0,49	0,64	0,77	0,97	3,59
K1	0,00	0,21	0,32	0,53	0,65	0,82	0,93	3,76
K+1	0,00	0,11	0,24	0,44	0,55	0,75	0,96	5,24
K2	0,00	0,03	0,10	0,38	0,52	0,65	0,93	3,85
K+2	0,00	0,12	0,27	0,55	0,69	0,91	1,14	6,12
K3	0,00	0,02	0,11	0,34	0,46	0,57	0,77	2,92
K+3	0,00	0,08	0,19	0,39	0,48	0,66	0,83	4,07
K4	0,00	0,04	0,14	0,44	0,60	0,71	0,97	3,17
K+4	0,00	0,09	0,20	0,42	0,55	0,70	0,88	4,61
K5	0,00	0,06	0,21	0,49	0,64	0,73	0,98	2,43
K+5	0,00	0,27	0,39	0,54	0,64	0,78	0,70	3,18
K6	0,00	0,04	0,11	0,24	0,36	0,43	0,60	3,37
K+6	0,00	0,06	0,17	0,34	0,44	0,61	0,76	3,61

Tabelle A54: Sorptionsdehnungen (ϵ_u) der Kalkputze, Beginn der Messung im Alter von 90 Tagen

Probe	relative Luftfeuchte / %							
	0	14	30	48	56	67	77	98
	Sorptionsdehnung ϵ_u / mm/m							
B1	0,00	0,01	0,06	0,06	0,09	0,08	0,10	0,14
B2	0,00	0,01	0,03	0,04	0,02	0,02	0,04	0,09
B3	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,07	0,11
B4	0,00	0,01	0,05	0,03	0,07	0,08	0,10	0,12
B5	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,10
B6	0,00	0,01	0,02	0,02	0,05	0,04	0,05	0,06
B7	0,00	0,01	0,03	0,03	0,05	0,05	0,07	0,09
B8	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06
B9	0,00	0,01	0,01	0,04	0,04	0,04	0,06	0,08
K1	0,00	0,01	0,02	0,03	0,06	0,05	0,07	0,11
K+1	0,00	0,01	0,02	0,05	0,04	0,04	0,05	0,11
K2	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,05	0,07	0,10
K+2	0,00	0,01	0,01	0,04	0,03	0,03	0,05	0,11
K3	0,00	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
K+3	0,00	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,11
K4	0,00	0,01	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,11
K+4	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,04	0,09
K5	0,00	0,01	0,01	0,04	0,02	0,04	0,05	0,09
K+5	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,07
K6	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,08
K+6	0,00	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,05	0,07

Tabelle A55: Ergebnisse der Hg-Druckporosimetrie der Kalkputze

Mörtel	Rohdichte / g/cm	Reindichte / g/cm	Gesamtporen / Vol.-%	Luftporen		Kapillarporen			Gelporen* / µm / Vol.-%	mittlerer Porenrad. / µm
				/ µm		/ µm				
				>50	50-10	10-1	1-0,1	0,1-0,01		
Ergebnisse im Alter von 28 d										
S1	1,74	2,47	29,7	3,3	1,5	5,6	12,4	6,4	0,5	0,25
S2	1,74	2,43	28,8	3,2	1,5	5,9	11,2	6,2	0,9	0,25
S3	1,75	2,48	29,5	3,1	1,6	6,5	11,6	6,0	0,9	0,27
S4	1,75	2,44	28,2	3,6	1,7	4,8	11,9	5,2	1,0	0,29
S5	1,80	2,52	28,8	3,0	1,3	5,6	12,7	5,2	1,0	0,28
Ergebnisse im Alter von 90 d										
S1	1,81	2,51	27,8	2,8	1,7	5,4	12,3	4,3	1,3	0,32
S2	1,84	2,54	27,5	2,7	1,9	6,8	10,2	4,7	1,2	0,37
S3	1,89	2,56	26,2	2,7	1,6	6,1	9,6	5,1	1,2	0,33
S4	1,88	2,59	27,3	2,7	1,9	6,7	10,4	4,4	1,2	0,42
S5	1,85	2,54	27,1	2,8	1,6	6,4	11,4	3,9	1,0	0,38
B1	1,77	2,51	29,6	2,7	0,8	2,1	16,6	7,2	0,2	0,21
B2	1,74	2,47	29,6	2,7	0,8	2,4	16,5	7,1	0,2	0,22
B3	1,73	2,51	30,9	2,5	0,9	3,9	14,2	9,3	0,1	0,24
B4	1,85	2,54	27,4	2,4	0,8	4,5	14,6	4,9	0,2	0,38
B5	1,81	2,55	29,3	2,5	0,8	4,7	12,8	8,3	0,2	0,29
B6	1,83	2,55	28,4	2,4	0,8	4,6	13,7	6,8	0,1	0,33
B7	1,77	2,44	27,7	2,7	0,8	2,0	15,8	6,2	0,2	0,29
B8	1,86	2,57	27,9	2,9	0,8	4,0	15,3	4,7	0,2	0,41
B9	1,80	2,56	29,7	2,8	0,9	5,5	12,8	7,6	0,1	0,37
K1	1,76	2,55	31,1	2,7	0,7	2,0	20,4	5,3	0,0	0,25
K+1	1,76	2,50	29,7	3,5	0,8	1,7	17,9	5,5	0,3	0,22
K2	1,63	2,53	35,5	2,4	0,6	1,8	25,8	4,9	0,0	0,37
K+2	1,75	2,53	31,1	2,6	0,7	1,0	21,3	5,3	0,2	0,30
K3	1,81	2,53	28,4	3,7	1,0	3,9	14,8	5,0	0,0	0,25
K+3	1,88	2,55	26,1	2,6	0,7	2,5	16,4	3,5	0,4	0,28
K4	1,76	2,52	30,3	2,7	0,8	4,4	18,1	4,3	0,0	0,41
K+4	1,78	2,57	30,7	2,8	0,6	1,0	21,9	4,2	0,2	0,37
K5	1,84	2,56	27,9	3,2	1,0	5,4	14,9	3,4	0,0	0,37
K+5	1,90	2,55	25,7	3,1	0,8	3,7	14,4	3,4	0,3	0,31
K6	1,81	2,56	29,4	2,9	1,0	5,6	15,6	4,3	0,0	0,44
K+6	1,88	2,55	26,5	2,6	0,8	4,0	15,5	3,4	0,2	0,38

* Der Begriff Luft-, Kapillar- und Gelporen wird für hydraulisch erhärtende Systeme verwendet und sind zum Vergleich angegeben.

