

**Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen
Mauerwerkes unter besonderer Berücksichtigung
bauschädlicher Salze**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Sylvia Stürmer
aus Naumburg

Weimar 1997

Gutachter: Prof. Dr. J. Stark
Prof. Dr. D. Knöfel
Prof. Dr. H. Budelmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Sanierung historischen Mauerwerkes durch Injektionen	10
2.1	Mauerwerksarten - Historisches Mauerwerk aus Naturstein, Ziegel und Mischmauerwerk	10
2.2	Mauerwerksverbände	11
2.3	Mauerwerksgefüge	12
2.4	Schäden an mehrschaligem historischem Mauerwerk	16
2.5	Möglichkeiten der Sanierung von mehrschaligem historischem Mauerwerk	19
2.6	Mauerwerksinjektionen	19
2.6.1	Historischer Rückblick	19
2.6.2	Ziele und Wirkungsmechanismen der Mauerwerksinjektionen	22
2.6.3	Injektionsverfahren	26
2.6.4	Mineralische Injektionsmörtel	27
3	Wirkung bauschädlicher Salze in historischem Mauerwerk	37
3.1	Herkunft der Salze und Schädigungsmechanismen	37
3.2	Die wichtigsten bauschädlichen Salze	38
3.3	Feuchtetransport in porösen Baustoffen und Löslichkeit der Salze	41
3.4	Treibender Angriff	45
3.5	Lösender Angriff	51
3.6	Schadensbilder und Schadensursachen	51
3.6.1	Auslaugungen, Aussinterungen und Kalkfahnen	52
3.6.2	Reaktionssäume und Ribbildung	54
3.6.3	Krustenbildung	54
3.6.4	Absprengungen und Abplatzungen (Frost-Tausalz-Angriff)	55
3.6.5	Spezialformen von Salzschäden	56
3.7	Maßnahmen zur Sanierung von Gebäuden mit Salzschäden	57
4	Entwicklung des Injektionsschaummörtels	62
4.1	Geschichtlicher Rückblick	62
4.2	Grundlagen und Definition	63
4.3	Herstellung des Injektionsschaummörtels	67
4.3.1	Einsatzstoffe	67
4.3.1.1	Schaumbildungsmechanismus und Schaumbildner	67
4.3.1.2	Schaumstabilität und Stabilisierer	70
4.3.2	Technologischer Ablauf und Gerätetechnik	70
4.4	Charakterisierung der verwendeten Bindemittel	77
4.4.1	Chemische und mineralogische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften	77
4.4.2	Mörteltechnische Kenngrößen	79
4.5	Frishmörteleigenschaften der Injektionsschaummörtel	80
4.5.1	Frishmörtelrohddichte und Luftporengehalt	80
4.5.2	Ausbreitmaß	80
4.5.3	Erstarrungsverhalten	80
4.5.4	Wasserrückhaltevermögen	81

4.5.5	Einfluß variiertes Wasser-Bindemittel-Werte und unterschiedlicher Schaumanteile auf die Frischmörteleigenschaften	82
4.5.6	Rheologische Untersuchungen	84
4.5.6.1	Untersuchungen mittels Viscomat	84
4.5.6.2	Untersuchungen mittels Marshtrichter und Auslaufbecher	86
4.5.7	Sedimentationsverhalten	87
4.5.8	Porengrößenverteilung und Einfluß des Pumpvorganges auf die Frischmörteleigenschaften bei verschiedenen Schaumbildnern	88
4.6	Festmörteleigenschaften	93
4.6.1	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper	93
4.6.2	Gefüge und Porengrößenverteilung	94
4.6.2.1	Untersuchung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie	95
4.6.2.2	Lichtmikroskopische Untersuchung der Porengrößenverteilung	96
4.6.2.3	REM-Gefügeuntersuchungen	98
4.6.3	Festmörtelrohddichte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul	104
4.6.3.1	Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer und den Lagerungsbedingungen	104
4.6.3.2	Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Rohddichte	106
4.6.3.3	Abhängigkeit vom Schaumanteil und W/B-Wert	107
4.6.3.4	Abhängigkeit von der Bindemittelart	108
4.6.3.5	Abhängigkeit von der Prüfkörpergeometrie	108
4.6.3.6	Korrelationen zwischen Frisch- und Festmörtelrohddichte	110
4.6.3.7	Korrelation zwischen dem dynamischen und statischen E-Modul	111
4.6.4	Biegezugfestigkeit und Zugfestigkeit	112
4.6.5	Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Festigkeiten	113
4.6.6	Gesamtporosität und Wasseraufnahmegrad	114
4.6.7	Kapillare Wasseraufnahme und -abgabe	116
4.6.8	Schwinden und Quellen	122
4.6.9	Wasserdampfdiffusionswiderstand	126
4.6.10	Sorptionsverhalten	127
4.6.11	Wärmeleitfähigkeit	128
4.6.12	Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel	128
4.6.13	Carbonatisierung	129
4.7	Festmörteleigenschaften im Verbund	134
4.7.1	Charakterisierung der Einsatzstoffe für die Verbunduntersuchungen	134
4.7.2	Bestimmung der Haftzugfestigkeit	135
4.7.2.1	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper	135
4.7.2.2	Verbund zu Natursteinen	136
4.7.2.3	Verbund zu Ziegeln	139
4.7.3	Verbunduntersuchungen an Modellmauern	141
4.7.3.1	Herstellung der Modellmauern und Versuchsinjektionen	141
4.7.3.2	Beschreibung des Haftverbundes anhand von Bohrkernen	142
4.7.4	Zusammenfassung	146
5	Verträglichkeitsuntersuchungen unterschiedlicher Bindemittel mit und ohne Schaum mit bauschädlichen Salzen	147
5.1	Innerer Angriff	149
5.1.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	149
5.1.2	Charakterisierung der verwendeten Salze	145
5.1.3	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper	150

5.1.4	Ergebnisse der Dehnungsmessungen und Beschreibung der äußeren Beschaffenheit der Prüfkörper	151
5.1.5	Verträglichkeitsuntersuchungen mit reaktionsfähigen Natursteinen	161
5.2	Äußerer Angriff	161
5.2.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	161
5.2.2	Untersuchungsergebnisse	162
5.2.3	Bewertung	166
5.3	Chemische Zusammensetzung der Porenlösung ohne und mit Sulfatzusatz	166
5.3.1	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper	167
5.3.2	Auspreßvorgang	168
5.3.3	Chemische Zusammensetzung der Porenlösung und pH-Werte	168
6	Applikation eines optimierten Injektionsschaummörtels an einem historischen Mauerwerk	175
6.1	Objektbeschreibung der Schönburg bei Naumburg	175
6.2	Erfassung des baustofflichen Ist-Zustandes der Ringmauer	175
6.3	Rezepturauswahl	176
6.4	Injektion	177
6.5	Injektionskontrolle	178
7	Anwendungsgebiete und Einsatzgrenzen des Injektionsschaummörtels	184
7.1	Anwendungsgebiete allgemein	184
7.2	Anwendungsbeispiele an Objekten in Thüringen und Mecklenburg-Vorpommern	185
7.2.1	Barbarossaturm auf dem Kyffhäuser bei Bad Frankenhausen	185
7.2.2	Kornmarktkirche in Mühlhausen	188
7.2.3	Gotisches Giebelhaus in Anklam	190
8	Verallgemeinerung der Vorgehensweise bei Mauerwerksinjektionen mit Injektionsschaummörtel	192
9	Zusammenfassung	193
10	Literaturverzeichnis	198
11	Anhang	205

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

AFm	Calciumaluminiumeisenmonosulfat
AFt	Calciumaluminiumeisentrisulfat
a	Ausbreitmaß
B/Z	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis
Blaine	spez. Oberfläche nach der Blaine-Methode bestimmt
Bmpur	erhärtetes Bindemittel
CL 90	Weißkalk mit 90 % CaO und MgO
Δ/l	Längenänderung
$\Delta m/m$	Masseänderung
DTA	Differenzthermoanalyse
E_{dyn}	dynamischer E - Modul
EB	Erstarrungsbeginn
EE	Erstarrungsende
ESEM	Environmental Scanning Electron Mikroskopie
ESMA	Elektronenstrahlmikroanalyse
FAZ	Flugaschezement
FTW	Frost - Tauwechsel - Widerstand
GP	Gesamtporosität
HAZ	Sulfathüttenzement zusammengesetzt aus 85 % H _Ü S, 10 % Anhydrit und 5 % PZ
HOZ	Hochofenzement
H _Ü S	Hüttensand
k.A.	keine Angaben
LP	Luftporengehalt
NE	Normalerhärtung
n.m.	nicht meßbar
nP	nach dem Pumpen
p	Druck
POLMI	Polarisationsmikroskopie
Pol. =	parallele Polarisatoren
Pol. +	gekreuzte Polarisatoren
PZ	Portlandzement
REM	Rasterelektronenmikroskopie
R ₄₀	Rückstand auf dem Sieb der Maschenweite 40 µm
R ₆₃	Rückstand auf dem Sieb der Maschenweite 63 µm
R ₉₀	Rückstand auf dem Sieb der Maschenweite 90 µm
SB	Schaumbildner
SL	Sulfatlagerung
SM	Schaummörtel
SFA	Steinkohlenflugasche

ST	Stabilisierer
TK	Traßkalk
Tr	Traßmehl
vP	vor dem Pumpen
Vol.-%	Volumenprozent
WA	Wasseranspruch
W/B	Wasser/Bindemittel - Wert
WKH	Weißkalkhydrat CL 90
WL	Wasserlagerung
WRV	Wasserrückhaltevermögen
W/Z	Wasser/Zement - Wert
XRD	Röntgendiffraktometrie
α_T	linearer Wärmedehnungskoeffizient
β_D	Druckfestigkeit
β_{BZ}	Biegezugfestigkeit
β_Z	Zugfestigkeit
β_{HZ}	Haftzugfestigkeit
β_{HS}	Haftscherfestigkeit
μ - Wert	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
ω	Wasseraufnahmekoeffizient
ρ	Dichte
ρ_f	Frishmörtelrohddichte
ρ_R	Reindichte
ρ_{fest}	Festmörtelrohddichte

Zementchemische Abkürzungen

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit „Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerkes unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze“ soll einen Beitrag zur Erhaltung mehrschaliger historischer Mauerwerke leisten. Sie behandelt die Entwicklung von Injektionsmörteln anhand von Laborversuchen bis hin zu Praxiseinsätzen und deren Auswertung.

Die Arbeit entstand in den Jahren 1992 bis 1997 während meiner Tätigkeit am Finger-Institut für Baustoffkunde, angeregt durch Herrn Prof. Dr. Ing. habil. J. Stark und Herrn Dipl. Ing. I. Mielke. Beiden möchte ich an dieser Stelle für die fachliche Unterstützung, die ständige Diskussionsbereitschaft und die intensive Betreuung der Arbeit danken.

Frau Helge Ristau, Frau Ute Tänzel, Herrn Dr. Ernst Freyburg, Frau Dipl.Ing. Sabine Freyburg, Herrn Mario Neugebauer, Frau Dr. Simone Palzer, Herrn Dr. Möser, Frau Dipl.Ing. Yvonne Lämmel, Frau Lydia Schmiedel, Herrn Andre Nasse und Frau Susanne Kilian danke ich für ihre Hilfe beim praktischen und analytischen Teil der Arbeit.

Bei den Mitarbeiterinnen der Bibliothek Frau Petigk und Frau Pettkus möchte ich mich für die freundliche Unterstützung bei der Literaturbeschaffung bedanken.

Herrn Dr. Carl Böttger und Herrn Dr. Frank Winnefeld sowie dem Leiter des Labors für Bau- und Werkstoffchemie, Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. D. Knöfel danke ich für die langjährige freundschaftliche Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mann Andreas Stürmer für die praktische und moralische Unterstützung, ohne die die Arbeit für mich nicht durchführbar gewesen wäre. Meinen Töchtern Viktoria und Laura danke ich für ihr Verständnis wegen des zeitweiligen Verzichtes auf Familienleben.

Abschließend möchte ich dem Bundesminister für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung meiner Arbeit danken.

Weimar, Juli 1998

Sylvia Stürmer

1 Einleitung

Voraussetzung für eine erfolgreiche Mauerwerkssanierung ist die Ermittlung der meist komplexen Schadensursachen. Zur umfassenden Anamnese gehören neben der Untersuchung der in den einzelnen Bauphasen verwendeten Baustoffe auch die Untersuchung der Tragstabilität, die Baugrunduntersuchung sowie die Untersuchung der bauphysikalischen und bauklimatischen Randbedingungen des betreffenden Mauerwerkes zur Ermittlung des Mauerwerksaufbaus (Gefüge, Verband, Mauerwerksbaustoffe), der Standfestigkeit, der Feuchte- und Temperaturverhältnisse sowie der Salzbelastung.

Die im Rahmen der Sanierung angewendeten Baustoffe und Applikationstechniken müssen den speziellen Mauerwerksbedingungen gerecht werden, dürfen aber die Originalsubstanz nicht unnötig belasten. D.h. wenn Eingriffe erforderlich werden, sollten sie so schonend und altmaterialverträglich wie möglich erfolgen.

Injektionen mit mineralischen Bindemitteln haben sich bereits bei vielen Bauwerken als schonende Variante der Mauerwerkssanierung bewährt, doch können die herkömmlichen Rezepturen und Methoden mit zahlreichen Nachteilen verbunden sein. Um eine ausreichende Fließfähigkeit zu erreichen, wird meistens mit hohen Wasser-Bindemittel-Werten gearbeitet, was sich aber hinsichtlich der Feuchte- und Massebelastung des Bauwerks sowie bezüglich der Entmischungsneigung des Injektionsmörtels ungünstig auswirkt. Häufig werden bei Injektionen hohe Drücke angewendet, die den Einsatz bei standsicherheitsbeeinträchtigten Mauerwerken unmöglich werden lassen. Da sich zur Hinterfüllung nur hydraulische, u.U. durch Feinststoffe gemagerte Bindemittel eignen, sind die erreichten Festigkeiten und Elastizitätsmoduln oft zu hoch und nicht dem jeweiligen Anwendungszweck angepaßt. Diese Nachteile des für schwer zugängliche Bauwerksabschnitte unumgänglichen Verfahrens der Mauerwerksinjektion waren Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit, die mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert wurde. Ziel der Arbeit war die Entwicklung variabler Injektionsmörtel, verbunden mit einem angepaßten Injektionsverfahren, die sich zum Verfüllen von Hohlräumen und Rissen, zur Stabilisierung von Mauerwerken und zur Verbesserung des Verbundverhaltens aller Mauerwerkskomponenten eignen.

Die Entwicklung der Injektionsschaummörtel auf der Basis hochhydraulischer Bindemittel umfaßte die Optimierung der Mörtelrezepturen, die Auswahl geeigneter Gerätekonfigurationen und die Erprobung eines unter verschiedenen baupraktischen Bedingungen realisierbaren technologischen Ablaufs.

Schwerpunkte dabei sind die chemische Verträglichkeit mit der Originalsubstanz und den Salzen, die in historischen Mauerwerken häufig in hoher Quantität und Komplexität auftreten, sowie die Anpassung der bauphysikalischen und Festmörtelkennwerte wie Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Wasserdampfdiffusionswiderstand usw. an die Anforderungen des zu sanierenden Mauerwerkes. Da sich die Eigenschaften der Injektionsmörtel in Abhängigkeit von den Bedingungen im Mauerwerksinneren, wie

Temperatur-, Feuchteverhältnisse, Salzbelastung und Grad der Behinderung, entwickeln und in großem Maße auch von den Eigenschaften, insbesondere dem Saugverhalten, der Mauersteine abhängig sind, wurden die Untersuchungen unter praxisrelevanten Bedingungen anhand von Modellschüttungen und Versuchsmauern im Verbund zu häufig an historischen Bauwerken im Thüringer Raum vorkommenden Natursteinen und unterschiedlichen Ziegelmaterialeien vorgenommen. Nach Bewertung der Labor- und kleintechnischen Versuche folgte der Einsatz ausgewählter Injektionsschaummörtel an Praxisobjekten. Die Praxiseinsätze wurden während der Applikation anhand von Frischmörteluntersuchungen überwacht. Die Festmörtel- und Verbundeigenschaften wurden anhand von Bohrkernen untersucht, die nach unterschiedlichen Standzeiten des Injektionsmörtels am Objekt an verschiedenen Stellen entnommen wurden.

2 Sanierung historischen Mauerwerks durch Injektionen

2.1 Mauerwerksarten – Historisches Mauerwerk aus Naturstein, Ziegel und Mischmauerwerk

Natursteinmauerwerk

Bauwerke aus Naturstein errichteten bereits die Ägypter vor mehr als 5000 Jahren [53]. Mit dem Bau der mittelalterlichen Burgen und den Städtegründungen der Romanik (11./12. Jh.) erlebte das Bauen mit Naturstein eine Blütezeit, die in den Bauten der Gotik (12.-16. Jh.) ihren Höhepunkt fand. Die in dieser Epoche entwickelte handwerkliche Kunst der Steinbearbeitung schuf Formenreichtum sowie Harmonie von Tragfunktion und Formgebung.

Die weite geographische Verbreitung des Natursteins führte zu einer enormen Vielfalt und Variation in der Konstruktion und Ausführung. Die Variationen betreffen die Gesteinsarten sowie deren Bearbeitung, den Mauerwerksverband und die Mauerwerksgefüge (Schaligkeit).

Ziegelmauerwerk

Auch die Fertigung künstlicher Steine, der Backsteine, geht auf die Ägypter und Mesopotamier zurück. Aus der Mitte des 15. Jh. v. Chr. stammen Wandmalereien, die Arbeitsgänge und Werkzeuge ägyptischer Ziegelherstellung abbilden [53]. Im Laufe der Jahrhunderte gelangte die Ziegelherstellung auch in die natursteinarmen Regionen Deutschlands und erlangte im Mittelalter seine erste Blüte. Die Mönche der Prämonstratenser und Zisterzienser Orden verhalfen diesem Baumaterial zu einer weiten Verbreitung. Durch die Möglichkeiten der Ziegelherstellung konnten jetzt auch in natursteinarmen Regionen größere Bauwerke errichtet werden.

Obwohl technisch hergestellt, ist der Ziegel keineswegs ein homogenes Erzeugnis, so daß die Variationen hierbei weniger die Steinformate und Verbände als vielmehr die stofflich-physikalischen Eigenschaften der Ziegel in Abhängigkeit von den lokalen

Rohstoffen, den meist manuellen Herstellungseinflüssen und den Brennbedingungen betreffen.

Mischmauerwerk

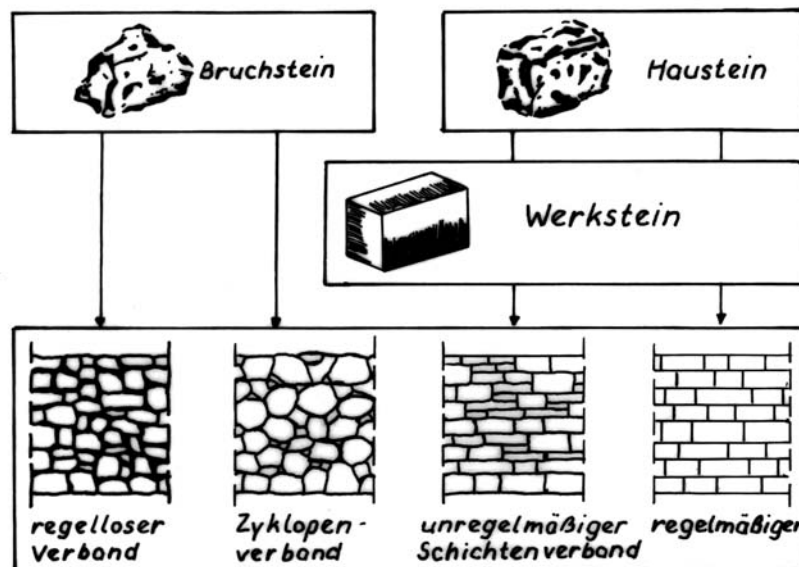
Dieses Mauerwerk ist eine Kombination aus Natursteinen und Ziegeln. Es ist meist so aufgebaut, daß einer äußeren Schale aus Naturstein eine innere aus Ziegelsteinen folgt. Es kann aber auch eine Hülle aus Ziegelsteinen mit Natursteinbruchmaterial gefüllt sein.

2.2 Mauerwerksverbände

Natursteinmauerwerk

Die Bearbeitungsstufe des Steines (Bruchstein → Haustein → Werkstein) bestimmt maßgeblich den Mauerwerksverband (Bild 1) und dadurch auch die Mauerwerksfestigkeit und den Widerstand gegen Verformung. Die DIN 1053, Teil 1 unterscheidet sieben Natursteinverbände, die vier Güteklassen zugeordnet werden, in welche die historischen Verbände weitgehend eingeordnet werden können.

Bild 1: Steinbearbeitungsstufen und Natursteinverbände



Mit steigender Bearbeitungsqualität der Natursteine werden einfachere Mauerwerksbauten ausführbar (einschalige oder zweischalige Gefüge, niedrigerer Mörtelanteil und kleinere Wandquerschnitte). Die Steinverarbeitung und der Verband beeinflussen auch das Bruchverhalten der Mauer.

Unbearbeitete Bruchsteine werden meist in regellosem Verband verarbeitet. Auch Zyklopenverbände sind u.U. daraus herstellbar. Die unregelmäßigen Steinoberflächen können bei regellosen Verbänden zu einem Mörtelanteil von bis zu 30% führen. Die

Festigkeit und Verformung hängen in solchen Fällen sehr vom Mörtelanteil und vor allem von dessen Qualität ab.

Schichtverbände werden überwiegend aus spaltrauen Hausteinen hergestellt. Es gibt unregelmäßige Schichtverbände, bei denen in einer Schicht unterschiedlich hohe Steine verarbeitet werden. Bei regelmäßigen Schichtverbänden ist die Höhe der Steine einer Schicht gleich. Unterschiedliche Steinhöhen beim unregelmäßigen Schichtverband können zu Steifigkeitsunterschieden und somit zu Spannungsspitzen bis hin zu lokalem Versagen des Mauerwerks führen. Der Mörtelanteil bei Schichtverbänden entspricht etwa dem bei künstlichem Mauerwerk (z.B. Ziegelmauerwerk), ist also deutlich geringer als bei regellosen Bruchsteinverbänden.

Ziegelmauerwerk

Ein Vorteil der Ziegel gegenüber Natursteinen ist ihre durch die Formgebung bestimmte Maßhaltigkeit, die durch die Formate beschrieben wird. Historische Formate sind z.B. das alte Badische Format, das alte Hamburger Format, die Klosterformate und das Reichsformat [17]. So konnten bei Verwendung von Ziegeln, die in den gleichen Formen hergestellt wurden, immer regelmäßige Verbände erstellt werden. Durch diese Regelmäßigkeit reduzierte sich die Höhe und Breite der Fugen gegenüber dem Natursteinmauerwerk (Ausnahme: gesägte Quader mit Knirschfuge), weshalb bei Ziegelverbänden i.d.R. ein geringerer Mörtelanteil vermauert wurde.

Die heutige Norm beschreibt den mittigen Läuferverband, den Binderverband, den Blickverband und den Kreuzverband [A4].

Historische Verbände entsprechen diesen Verbandsregeln nicht in jedem Fall. Als Beispiel sei hier der mittelalterliche Verband (auch märkischer, polnischer oder wendischer Verband genannt) angeführt. Dieser Verband bedeutet die größtmögliche Einsparung an Verblendmaterial, ohne die üblichen Abmessungen der einzelnen Ziegelsteine zu ändern. Er stimmt nicht mit den herkömmlichen Lehren über den „Steinverband“ überein. Tatsächlich entsteht durch diese Art des Verbandes eine gesonderte Verblendhaut, die nur einen halben Ziegel stark ist und durch wenige Bindersteine mit der Hintermauerung, dem Mauerkerne, zusammenhängt. Bei dem mittelalterlichen Verband folgen 2 oder 3 Läufer auf einen Binderstein. In der Schicht darüber verschiebt sich die Anordnung um einen Viertel- oder Dreiviertelstein, indem sich der Binder unter der Mitte des darüberliegenden Läufers befindet. Bei diesem Verband ist man vom Format des Hintermauerungssteins unabhängig [73]. Es wurden auch Steine zweiter Wahl und Backsteinbruchstücke zum Ausmauern des Kernes verwendet [17].

2.3 Mauerwerksgefüge

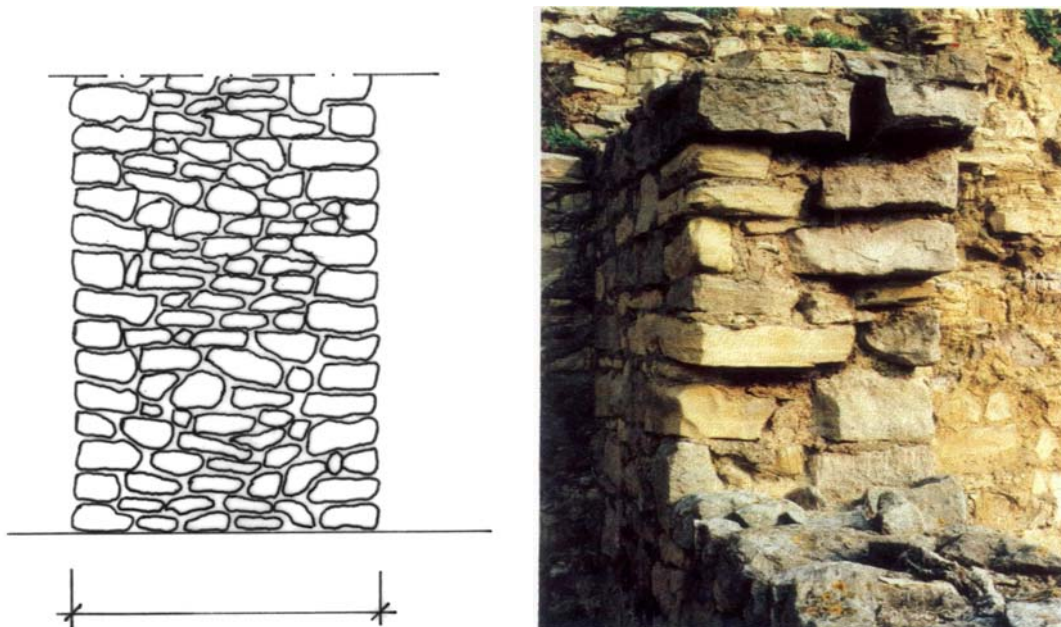
Einschalige Gefüge

Die Wanddicke mittelalterlicher Bauwerke ist wesentlich größer als die heutiger Bauten aus Beton und Ziegel. Sie variiert zwischen 80 bis 200 cm und ist im Bereich von Turmstümpfen z.T. noch dicker. Daher war es nicht möglich, Wände mit

Ansichtsflächen aus Hau- oder Werksteinen über ihre gesamte Stärke verbandsgerecht durchzumauern.

Bei Wänden aus unbearbeiteten Bruchsteinen im regellosen Verband kann von einem gewissen homogenen Wandquerschnitt ausgegangen werden. Dieser entsteht dadurch, daß die Bruchsteine unregelmäßig tief einbinden. Dadurch kommt es zu einer Verzahnung zwischen den Außenflächen mit dem Kern, es ist keine durchgehende Schalenfuge vorhanden. Die Bruchsteine im Wandinneren sind geschichtet, und der gesamte Wandquerschnitt wird gleichzeitig aufgemauert. Die geringere Packungsdichte der Natursteine im Inneren der Wand wird durch einen erhöhten Mörtelanteil ausgeglichen. Da gleichmäßig aufgemauert wird, ist der Mauer Mörtel über den gesamten Wandquerschnitt hinsichtlich Bindemittelgehalt und Größtkorn nahezu identisch. Man spricht von einem einschaligen Mauerquerschnitt (Bild 2).

Bild 2: Einschaliger Wandquerschnitt



Mehrschalige Gefüge

Von mehrschaligen Wänden wird gesprochen, wenn im Wandinneren ein Wechsel in der Steinbearbeitung bzw. im Verband vorhanden ist. Diese Art von Wänden ist mit Hau- oder Werksteinen ausgeführt. Hauptvertreter dieses Gefüges sind zwei- und dreischalige Mauerwerke. Seltener wird das vierschalige Mauerwerk angetroffen.

Zweischalige Gefüge

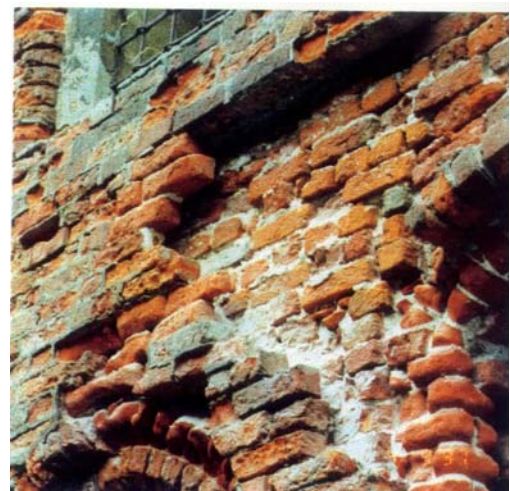
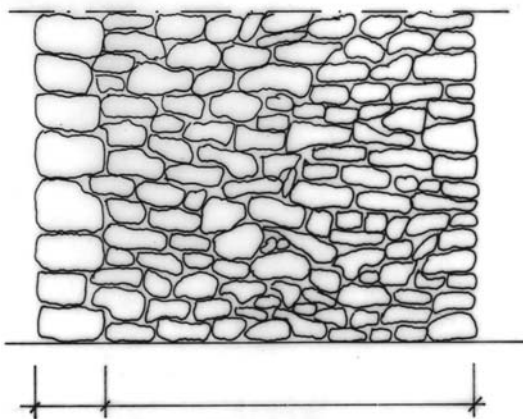
Zweischalige Natursteinmauern haben eine Außenschale aus Hausteinen und eine innere Schale aus unbearbeiteten, z.T. im regellosen Verband vermörtelten Bruchsteinen. Während die Außenschale selten dicker als 30 cm ist, kann die Innenschale durchaus bis zu 1,5 m dick sein.

Die Stabilität der Außenschale ist i.d.R. so gering, daß beide Schalen gleichzeitig hergestellt werden mußten. Hauptsächlich trifft man diese Art der mehrschaligen Mauern bei mittelalterlichen und neugotischen Kirchen.

Zweischaligkeit bei Ziegelmauerwerk liegt u.a. vor, wenn die Außen- oder Innenschale nicht durch eine ausreichende Anzahl Bindersteine in den angrenzenden Mauerwerkskörper einbindet (Bild 3).

Häufig sind zweischalige Gefüge auch als Mischmauerwerk ausgeführt, d.h. einer äußeren Schale aus Naturstein folgt eine innere aus Ziegelsteinen oder umgekehrt.

Bild 3: Zweischaliger Wandquerschnitt



Dreischalige Gefüge

Ein sehr häufig anzutreffender Vertreter des mehrschaligen Mauertyps ist die dreischalige Mauer. Die Außenschalen, sowohl luftseitig als auch innenraumseitig, wurden hier überwiegend aus Werksteinen hergestellt. Zwischen den Werksteinschalen befindet sich die Innenschale, der Mauerwerkskern. Die Außenschalen sind i.d.R. bis zu 50 cm dick, und die Gesamtmauerstärke reicht weit über einen Meter.

Diese Art des Mauerwerkbaus bot verschiedene Vorteile. So konnten die Werksteine vorgefertigt und auch unabhängig von der Innenschale aufgemauert werden, da sie allein schon relativ stabil standen. Die Innenschale wurde wenig später verfüllt. Das Auffüllen konnte durch Schütten und Verdichten erfolgen, ein Schichten war nicht erforderlich. Die Innenschale wurde mit einem Gemisch aus Mörtel sowie Feld- und Bruchsteinen oder mit Resten der Werksteinbearbeitung verfüllt. Da der Mörtelanteil in den Innenschalen sehr hoch und dessen Zusammensetzung sehr unterschiedlich ist, kann die Qualität der Innenschalen von loser Schüttung bis zu „Beton“-Qualität reichen. Vereinzelt treten auch vierschalige Mauerwerksgefüge auf (Bild 5) wie z.B. an der Nordfassade des Belvedere auf dem Pfingstberg in Potsdam. Das mehrschalige Mischmauerwerk besteht nach Untersuchungen von Warnecke [64] aus einer innenraumseitigen, ca. 36 cm starken, im Verband gemauerten Ziegelschale, einer ca.

30 cm starken, regellosen, vollfugig vermörtelten Ziegelschale, einer ca. 55 cm starken, aus Bruchsteinen im regellosen Verband erstellten Natursteinschale und einer Verblendschale aus Naturwerksteinen im Zyklopenverband (Bild 6).

Bild 4: Dreischaliger Wandquerschnitt

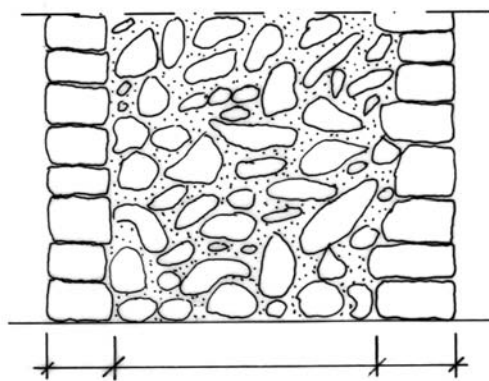


Bild 5: Vierschaliger Wandquerschnitt

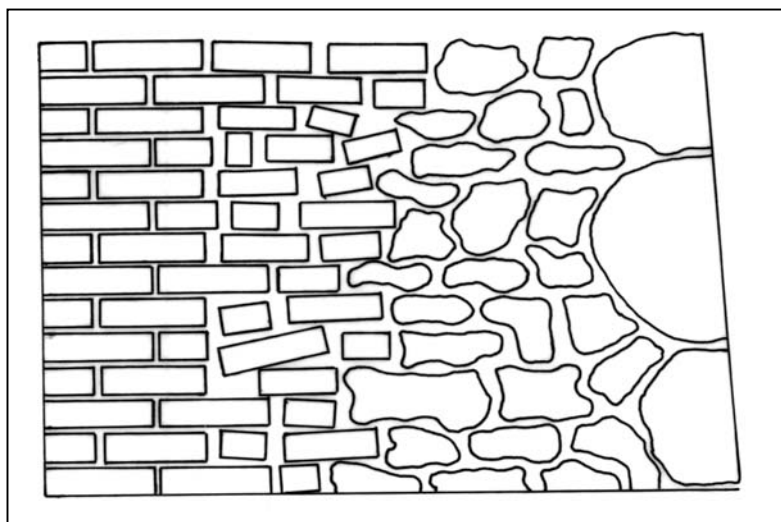


Bild 6: Vierschaliges Mauerwerksgefüge an der Nordfassade des Belvedere auf dem Pfingstberg in Potsdam



Die Kombinationen der einzelnen Mauerwerksverbände mit den verschiedenen Mauerwerksbaustoffen und der Gestaltung unterschiedlicher Mauerwerksgefüge führte zu einer großen Vielfalt bei historischen Bauwerken. Die Ausführung gemäß ihrer Bedeutung als Sakral- oder Profanbauten sowie regionale Einflüsse steigerten diese Vielfalt noch. Selbst an einem Objekt wurden verschiedene Bauteile entsprechend ihrer Funktion in unterschiedlicher Weise ausgeführt. Bautechnische Veränderungen im Laufe der Jahrhunderte wurden meist zeitgemäß unter Einbeziehung des Baustils der jeweiligen Epoche vorgenommen, so daß häufig eine Vielgestaltigkeit des Mauerwerksbaus vorliegt, die selbst unter Einbeziehung moderner Bauwerksanalytik nicht in jedem Fall vollständig erfaßt werden kann. Daraus resultieren u.U. große Probleme bei der Sanierung solcher Bauwerke. Auch der Versuch, übergreifende Aussagen zum Tragverhalten historischen Mauerwerks zu machen, ist zum Scheitern verurteilt. Trotz vielfältiger Untersuchungen sind Ergebnisse immer nur bei gleichem Mauerwerkstyp mit vergleichbaren Mauerwerksbaustoffen und bei gleichem Gefüge aussagekräftig.

2.4 Schäden an mehrschaligem historischem Mauerwerk

Die Klärung der Schadensursachen ist für eine erfolgreiche Sanierung von größter Bedeutung. Schäden können bereits durch falsche Konstruktion oder durch Fehler bei der Bauausführung zur Bauzeit „vorprogrammiert“ worden sein. Andererseits entstehen Schäden während der Nutzung z.B. durch Unwetter, Kriegsbelastungen oder Umbauarbeiten. Die Schäden können sowohl durch „innere“ Schadensquellen, z.B. Hohlräume im Mauerwerk oder unzureichende Qualität der Mörtel und Mauersteine, als auch „äußere“ Schadensquellen, z.B. Fremdsalzbelastung oder Durchfeuchtung verursacht werden. Schadensarten und -quellen überlagern sich auch häufig, wodurch die eigentliche Ursache nicht in jedem Fall eindeutig erkennbar ist. Im folgenden

werden einige Schäden und ihre Ursachen aufgeführt, wobei auf die Ursachen nicht näher eingegangen werden soll.

- konstruktionsbedingte und Ausführungsschäden:
 - * Planungsfehler
 - * statische Fehler
 - * bauphysikalische Fehler
 - * Ausführungsmängel

- Materialschäden:
 - * nicht angepaßter Materialeinsatz (baustoffliche und bauphysikalische Kennwerte)
 - * chemisch unverträgliche Mörtel und Steine
 - * mangelnde Qualität der Steine und des Mörtels

- Bearbeitungsschäden/
Umbschäden:
 - * bauphysikalische Veränderungen
 - * unangepaßte Fugenerneuerung oder Steinaustausch
 - * Tiefbauarbeiten und Grundwasserabsenkung

- Korrosionsschäden
(chemische Einwirkung)
 - * Hydratation
 - * Kristallisation
 - * Lösungsvorgänge
 - * hygroskopische Feuchteaufnahme bei Salzbelastung

- Erosionsschäden
(mechanische Einwirkung)
 - * fließendes Wasser, Regen
 - * Abtragung durch Eisschub, Frost oder Wind
 - * starke und häufige Temperaturwechsel

- Schäden durch biologische Einflüsse
 - * Mikroorganismen (z.B. Nitrifikanten, Thiobacillus)
 - * durch biologische Zersetzung entstehen schädliche Huminsäuren
 - * Algen und Flechten scheiden Säuren aus
 - * Bewuchs, Sprengwirkung durch Wurzeln

- nutzungsbedingte Schäden
 - * Nichtnutzung und damit fehlende Instandhaltung
 - * Nutzung mit zu hohem Komfortanspruch
 - * zweckentfremdete Nutzung

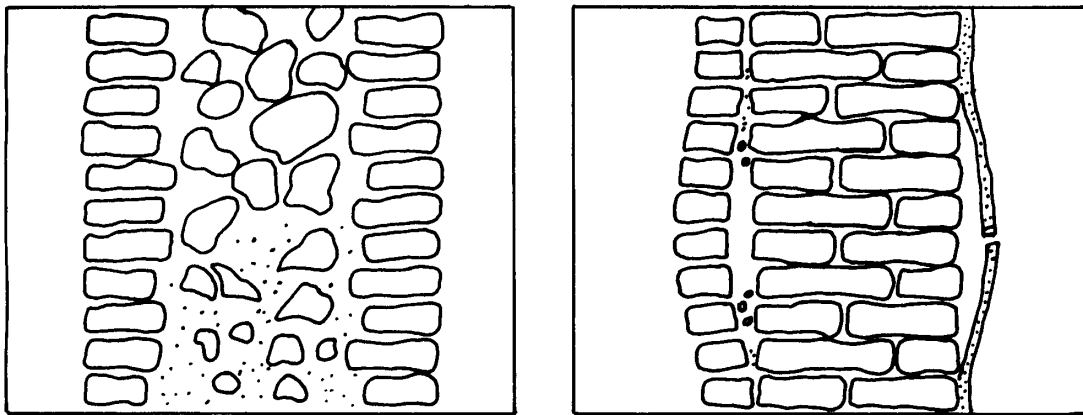
- Brandschäden
 - * extreme thermische und Feuchtebelastung (durch Löscharbeiten)
 - * Spannungen durch unterschiedliche α_T -Werte der Baustoffe
 - * chemische Veränderungen der Baustoffe z.B. durch Hydratwasserabgabe

Den Schäden durch Feuchte- und Salzbelastung kommt bei den historischen Mauerwerken, insbesondere aufgrund fehlender Vertikal- und Horizontalabdichtung eine besondere Bedeutung zu, weshalb diese unter Punkt 3 detailliert behandelt werden. Im folgenden werden zwei Beispiele von Schäden des Mauerwerksgefüges kurz beschrieben, die auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden und in der Sanierungspraxis sehr häufig anzutreffen sind.

Beispiel 1 - Materialschaden: zeigt schematisch ein dreischaliges Mauerwerk, dessen Mauerkern mit minderwertigen Baustoffen (Gesteinsbruchsteine, Mörtel minderer Qualität) gefüllt wurde (Bild 7, linke Seite). Durch Verwitterung wurde der Mörtel teilweise ausgewaschen, wodurch Hohlräume entstanden sind, die bei Belastung des geschwächten Mauerwerks zu Rissen führen.

Beispiel 2 - Ausführungs- oder nutzungsbedingter Schaden: zeigt schematisch ein einschaliges Mauerwerksgefüge (Verband), dem außenseitig eine Verblendschale vorgemauert wurde, ohne Einbindung in das bestehende Gefüge durch Bindersteine oder Anker (Bild 7, rechte Seite). Die Innenseite wurde mit einer Putzschicht versehen. Bei Belastung des Mauerwerks hält die Außenschale nicht stand, wodurch es zu Spalten und „Ausbauchungen“ bis hin zum völligen Verlust der Außenschale kommen kann. Aber auch an exakt ausgeführtem Mauerwerk unter Verwendung hochwertiger Baustoffe kann es bei Überbelastung oder durch Setzungen zu Hohlräumen und Rissen kommen.

Bild 7: Schematische Darstellung von Mauerwerksschäden



2.5 Möglichkeiten der Sanierung von mehrschaligem Mauerwerk

Zur Sanierung von desolatem historischem Mauerwerk gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten:

Abbau + Wiederaufbau:

- bei dieser Verfahrensweise werden geschädigte historische Gebäude teilweise oder komplett rückgebaut und detailgetreu wiedererrichtet
- dafür sind aufwendige Fotogrammetrie, Stein- und Mörtelkartierungen erforderlich
- die vorhandenen historischen Materialien wie Steine, Dachziegel usw. werden z.T. wiederverwendet
- aus bautechnischen Gründen ist oft der Einsatz neuer Materialien, hauptsächlich neuer Mörtel notwendig

Vormauern von Schalen:

- vor die vorhandene historische Bausubstanz werden neue Schalen gemauert
- sie übernehmen z.T. oder ganz die statischen Funktionen der alten Wand, schützen auch die historische Substanz vor Witterungseinflüssen
- durch die neuen Schalen ist die historische Substanz nicht mehr oder nur noch z.T. sichtbar

*Statische Sicherung:
(Verpressen, Injizieren
Verfugen, Vernadeln
u.a.)*

- bei diesen Methoden wird ohne größere Veränderungen am bestehenden Objekt die statische Sicherheit erhöht bzw. neue statische Sicherheit erreicht
- die vorhandene Substanz wird geschont
- der Denkmalwert bleibt fast unbeeinflusst

2.6 Mauerwerksinjektionen

2.6.1 Historischer Rückblick

Die Techniken des Verfüllens oder Verpressens von Bauwerken sind nicht neu. Schon zu Beginn vorigen Jahrhunderts, erste Versuche sind aus dem Jahr 1802 belegt, wurden Objekte auf diese Art behandelt. Gut einhundert Jahre später, mit der Entwicklung der Bohrtechnik, kam die Möglichkeit hinzu, durch den Einbau von Stahlnadeln und später auch Spannankern, die Tragfähigkeit von Mauerwerk zu erhöhen.

Zur damaligen Zeit stand meist die statische Sicherung eines Bauwerkes im Vordergrund, erst später wurden solche Arbeiten auch gezielt unter dem Aspekt des Denkmalschutzes und der Denkmalpflege durchgeführt.

Mit den Ergebnissen, aber auch mit den Fehlern aus den Anfängen dieser Techniken beschäftigte sich der Sonderforschungsbereich 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“. Der SFB 315 ist eine Gemeinschaftsarbeit verschiedener Fakultäten der Universität Karlsruhe, in dem die verschiedensten Projekte, die sich mit der Erhaltung dieser Bauwerke auseinandersetzen, beschrieben, untersucht und ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind in den Jahrbüchern von 1986 bis 1993 dokumentiert.

Die erste Verpressung bzw. Auffüllung einer Kaimauer aus Naturstein und Kalkmörtel wird dem französischen Ingenieur CHARLES BERIGNY zugeschrieben. Mit einer von ihm selbst entwickelten Spindelschlagpumpe führte er im Jahr 1802 Arbeiten im Hafen von Dieppe aus. Als Material kam eine Suspension aus Ton und Kalk zum Einsatz, deren Dauerhaftigkeit jedoch nicht groß war [31].

Einen enormen Fortschritt auch in bezug auf die Dauerhaftigkeit von Injektionsmörteln stellte 1843 die Entwicklung des Portlandzementes durch den Engländer ASPDIN dar. Dieses Bindemittel konnte wegen seiner hydraulischen Erhärtung auch in solchen Bereichen eingesetzt werden, wo der für die Erhärtung der Kalkmörtel notwendige Luftzutritt nicht gewährleistet war.

In Deutschland bestand zu dieser Zeit Handlungsbedarf für die Abdichtung feuchter Eisenbahntunnel. Die bergmännisch vorgetriebenen und danach ausgemauerten Tunnel konnten Sickerwasser nicht zurückhalten. Dadurch wurde der Mörtel aus den Fugen des Tunnelgewölbes gewaschen. Die Steine wurden in Verbindung mit schädlichen Lokomotivabgasen z.T. erheblich geschädigt. Die bis dato angewendete Methode, die Tunnelgewölbe von oben mit Asphalt abzudecken, war nur selten von Erfolg gekrönt. Als Erster versuchte daher der königlich-württembergische Bauinspektor DASER 1871 durch die Einpressung von Zementleim den Wassereinbruch in einen Tunnel zu stoppen. Der eingepreßte Zementleim hatte nach [2] ein Mischungsverhältnis von fünf Teilen Zement und vier Teilen Wasser. Das entspricht einem W/Z-Wert von 0,8.

DASER gelang es mit diesem Verfahren, die Tunnelstrecke soweit abzudichten, daß nur noch vereinzelt Tropfenfall zu registrieren war. Dies gilt als der erste erfolgreiche Versuch, an freistehendem Mauerwerk ausgewaschenen Mörtel durch ein gegenüber Feuchtigkeit resistentes Material mit Hilfe einer Pumpeinrichtung einzubringen.

Im Jahr 1882 gelang es in England im Hafen von Greenock, ein altes Trockendock auf ähnliche Weise abzudichten. Dazu wurden in die Wände des Docks Bohrungen eingebracht, in die durchlöchernde Standrohre gestellt wurden. Durch diese gelangte die „dicke Schlämpe“ aus reinem Portlandzement aufgrund ihres Eigengewichtes in die Spalten und Fugen der Mauern und verband sich mit dem alten Material. Der Erfolg war so gut, daß die zur Wasserhaltung bis dahin ständig arbeitende Pumpe nur noch stundenweise in Betrieb genommen werden mußte [31].

Erstmals wird im Jahr 1910 in einem Artikel von AUGUST WOLFSHOLZ [71] die Sicherung einer Brücke beschrieben, die durch Risse und Hohlstellen im Mauerwerk

ernsthaft in ihrer Standsicherheit gefährdet war. WOLFSHOLZ, einer der eifrigsten Verfechter und Vorreiter der Zementverpressung in Deutschland, beschreibt darin die Arbeiten an der Eisenbahnbrücke über den Mittel- und Südkanal in Hamburg. Diese aus Ziegelmauerwerk errichtete Brücke wies Risse in Längs- und Querrichtung und Hohlräume im Inneren auf. Im Gegensatz zu den bisherigen Maßnahmen an Tunnel- oder Wasserbauwerken gingen die Bohrungen für das Injektionsgut nicht durch das Objekt hindurch, sondern endeten im Mauerwerk. WOLFSHOLZ verwendete ebenfalls Zement. Dieser wurde ohne Sandzusatz nur mit Wasser zu einer leichtfließenden „Milch“ verarbeitet, um der Gefahr von Verstopfungen entgegenzuwirken [70].

Auf diese Weise wurden in den folgenden Jahrzehnten unzählige Bauwerke erfolgreich in ihrem Bestand gesichert. Die Reihenfolge der Arbeiten - Erkundung, Bohren, Ausspülen der Bohrlöcher, Suspension mit entsprechender Zusammensetzung von unten nach oben bei angepaßtem Druck verpressen - ist heute, nach über 80 Jahren, bei der konstruktiven Sicherung historischer Bauten Stand der Technik.

Die in der Literatur beschriebenen Beispiele zeigen, daß die „Erfindung“ und Weiterentwicklung des Portlandzementes eine außerordentliche Wirkung auf das Verpressen und Injizieren hatte. Bis auf wenige Objekte aus der Anfangszeit der Verpressung, wo Ton und Kalk als Suspension verarbeitet wurden und dadurch der Erfolg nicht dauerhaft sein konnte, wurde und wird hauptsächlich Zement als Injektionsmaterial verwendet.

Neben dem Portlandzement, der in Deutschland erstmalig 1855 in der „Stettiner Portland-Cement-Fabrik“ [53] hergestellt wurde, kamen später auch Erzzement und hüttensandhaltige Zemente, sowohl Hochofenzement als auch Sulfathüttenzement, zur Anwendung. Außer den hüttensandhaltigen Zementen wurde auch Thurament zur Verpressung und für Tiefenverfugungsarbeiten eingesetzt. Thurament ist ein stark latent-hydraulisch wirkender Bindebaustoff ohne nennenswerte Eigenfestigkeit, der in Verbindung mit Portland-, Hüttenzement oder Kalk verarbeitet wurde [75]. Thurament ist zeitlich begrenzt (ab 1923) in der früheren Zementfabrik Unterwellenborn hergestellt und u.a. für Wasserbauten und Autobahnbrücken verwendet worden. Neben dem Hüttensand kamen aber auch andere industrielle Anfallstoffe als Mörtelzusätze zum Einsatz. So wurde z.B. an der Johanniskirche in Ellrich und dem Dom zu Nordhausen bei Sanierungsarbeiten in den Jahren 1929 bis 1932 u.a. Erzzement unter Zugabe von Sika (amorphe Kieselsäure) verarbeitet. Die Rezepturen wurden von Rüth [20] erstellt.

Da der Zement in den meisten Fällen nur mit Wasser ohne Zuschlag verarbeitet wurde, ist die Bezeichnung „Injektionsmörtel“ nicht in jedem Fall exakt. So werden die Materialien für die Verpressung neben dem Begriff Injektionsmörtel auch als Injektionsgut, Injektionsstoff oder Injektionsmittel bezeichnet. Die bei der Injektion angewandten Konsistenzen reichten von einer „dicken Schlämpe“ bis hin zu „dünnflüssiger Zementmilch“. Seltener wurde und wird die Zementsuspension mit Sand abgemagert, obwohl das ökonomische Vorteile bringt. Man hatte erkannt, daß dies zu Problemen bei der Durchdringung (Penetration) des Mauerwerksgefüges führen kann, d.h. die Suspension erreichte oftmals auch unter großem Druck nicht alle Hohlräume, Risse oder Fehlstellen.

Seit ca. 30 Jahren werden Risse und Hohlräume im Mauerwerk auch mit Epoxidharz kraftschlüssig verfüllt. Das ist jedoch nur bei der Verfüllung feiner Risse und Hohlräume mit geringem Volumen sinnvoll. Bei größerem Hohlraumvolumen kann die Harz-verfüllung aufgrund der geringen Eigensteifigkeit des Harzes nicht zur Erhöhung der Tragfähigkeit herangezogen werden [61]. Als reines Verfüllgut sind die Harze bei hohem Materialbedarf zu kostenintensiv. Darüber hinaus weisen die Polyurethane und Harze eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Feuchte auf, wodurch es bei den meist feuchten historischen Mauerwerken zu Verbundproblemen zwischen dem organischen Injektionsgut und den Rißflanken kommen kann.

Seit ca. 20 Jahren werden die zementhaltigen Injektionsmörtel durch den gezielten Einsatz von Mörtelzusatzmitteln vergütet. Als Zusatzmittel kommen insbesondere Verflüssiger, Stabilisierer und Injektionshilfen zur Anwendung, die das Wasser-rückhaltevermögen des Mörtels bei stark saugendem Gestein erhöhen und die Sedimentation der Zement- und z.T. Zuschlagpartikel im wasserreichen System verhindern.

2.6.2 Ziele und Wirkungsmechanismen der Mauerwerksinjektion

Zielgruppen der Injektion und Verfüllung allgemein

- kraftschlüssiges Verfüllen von Rissen und Hohlräumen im Mauerwerk in Verbindung mit Vernadelung und /oder Verankerung unter Verwendung von Zementsuspensionen, -mörteln, hochhydraulischen Werk trockenmörteln und Harzen
4 Wirkungsmechanismen nach [65]:
 - a) Hohlrauminjektion
 - b) Penetration
 - c) Spaltinjektion
 - d) Vernadelung
- horizontale Sperrung bzw. Reduzierung aufsteigender Feuchte unter Verwendung von Harzen, Zementsuspensionen, Paraffin [10], Microemulsionen und Alkalisilikaten
Wirkmechanismen, Verfahrenshinweise und Anforderungen an die Injektionsstoffe gemäß des WTA-Merkblattes 4-4-94: Mauerwerksinjektion [A21]
Eine Marktübersicht über Injektionsverfahren und Injektionsmittel in Deutschland ist für diese Zielgruppe in [74] dargestellt.
- Schließen von Rissen im Beton gemäß ZTV-Riss 1993 [A23] unter Verwendung von Epoxidharz geprüft nach TP FG-EP [A24], Polyurethan geprüft nach TP FG-PUR [A25], Zementleim (ZL) und Zementsuspensionen (ZS) geprüft nach TP FG-ZL/ZS [A26], Materialempfehlungen gemäß der BAST-Liste.
Im Unterschied zur ZTV-RISS 88 sind jetzt auch Zementleime und Zementsuspensionen für das Schließen, Abdichten und kraftschlüssige

Verpressen von trockenen, feuchten und wasserführenden Rissen zugelassen. Darüber hinaus ist neben der Riverpressung auch die Hohlraumverfüllung geregelt [5].

- Einpressungen in Baugrund, Untergrund und Bergbau gemäß DIN 4093 [A9] und DIN 18309 [A10] unter Verwendung von Zementsuspensionen/-mörteln (siehe Bilder 8 bis 10), Silikatgel, Kunstharz und Ton-Zement-Suspensionen; Zementeinpressungen im Bergbau gemäß Merkblatt [A29]
- Bodenverfestigung mit Kalk, hochhydraulischem Kalk und Zement gemäß der Merkblätter [A27, A28]

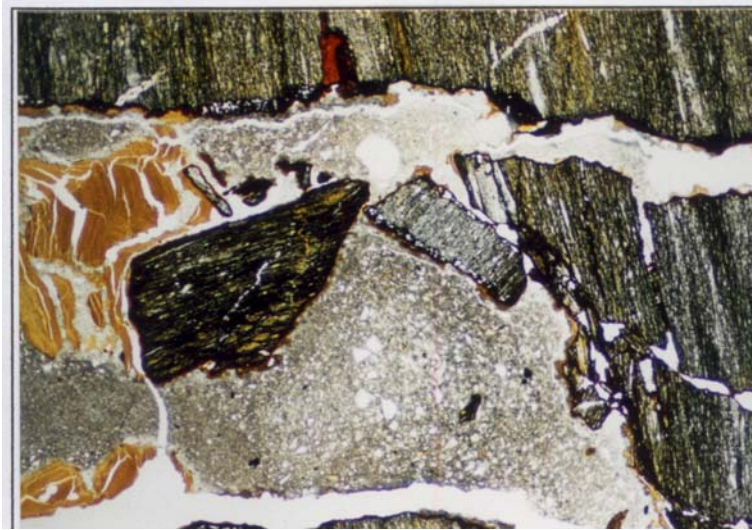
Bild 8: Talsperre Weida, Zementleiminjektion mit Sulfathüttenzement im gründungsnahen Bereich der Sperrmauer (Baugrund: Unterkarbon-Tonschiefer)



Bild 9: Zementleiminjektion in einer Mikrokluft; Zementstein überwiegend karbonatisiert (Maßstabsbalken = 2,5 mm)



Bild 10: Kontaktbereich Zementstein-Tonschiefer; durch die Injektion mitgerissene Tonschieferpartikel; an Klufrändern Eisenoxid POLMI 35× Pol. =



Die folgenden Beschreibungen beschränken sich nur auf die erste Zielgruppe. Zur Konsolidierung von historischem Mauerwerk werden seit langem die Techniken Verfugen, Verpressen, Vernadeln und Vorspannen angewendet. Die Konsolidierung der Tragfähigkeit wird notwendig, wenn die globale Standsicherheit des Bauteils gefährdet ist oder wenn im Zuge einer geplanten Umnutzung die Aufnahme zusätzlicher Lasten erforderlich wird. Sie soll Schwächen des Mauerwerksgefüges beheben und dessen Integrität wieder herstellen [65]. Das Ausfüllen der Risse und Hohlräume mit Zement trägt auch ohne die Vernadelung bereits zur Verbesserung der Tragfähigkeit bei. Die Kräfte brauchen dann nicht mehr um die Hohlräume herum zu fließen, und der erhärtete und gut haftende Zement bewirkt schon von sich aus eine Verbesserung der Querkrafttragfähigkeit [36]. Entsprechende Versuche von Dahmann [7] haben jedoch ergeben, daß die Steigerung der Tragkraft durch alleiniges Verpressen ohne Nadeln nicht die Werte mit Vernadelung erreicht. Die o.g. Instandsetzungstechniken helfen, mehr als der Abbau und Wiederaufbau oder das Vormauern neuer Schalen, den Denkmalwert historischer Bauwerke zu bewahren. Außerdem werden die Kosten in der Regel geringer ausfallen als bei Abbau und Wiederaufbau.

Wirkungsmechanismen der Konsolidierung durch Injektion und Vernadelung nach [65]

Spaltinjektion

Darunter wird die gezielte Injektion ausgewitterter oder bauseitig bedingter Spalten zwischen Mauerwerksschalen verstanden (siehe Bild 7, rechts). Der Verbund zwischen den Schalen kann dadurch wiederhergestellt werden, sofern es sich um kohäsive Schalen handelt. Bei nicht kohäsiver Innenschale ist die Spaltinjektion wirkungslos.

Von anderen Autoren wird anstelle der „Spaltinjektion“ auch der Begriff „Hinterfüllung“ verwendet.

Hohlrauminjektion

Für eine erfolgreiche Hohlrauminjektion ist es erforderlich, die Lage der Hohlräume weitestgehend zu kennen und sie durch gezielte Bohrungen zu erschließen. Selbst bei umfangreicher Mauerwerkserkundung durch Endoskopie ist es jedoch nicht möglich, alle Hohlräume und Klüfte im Mauerwerksinneren zu lokalisieren, weshalb auch der Injektionsfluß nicht vollständig kontrolliert werden kann. Da Spalten zwischen den Mauerwerksschalen bzw. Risse in den Schalen bevorzugte Injektionswege darstellen, ist eine Hohlrauminjektion häufig nur in Verbindung mit einer Spaltinjektion bzw. Rißverpressung möglich.

Entsprechen die mechanischen Eigenschaften des Injektionsgutes annähernd denen des vorhandenen Mauermörtels, besteht die Wirkung der Injektion unabhängig von der Geometrie der injizierten Hohlräume in der Vergrößerung des Mörtelvolumenanteils. Entsprechen sie hingegen eher denen des Steins, ist die Wirkung der Injektion von der Geometrie abhängig. Werden durch die Injektion überwiegend verästelte Spalten und Klüfte erschlossen, führt die Injektion zu einer Vergütung der Mörtelmatrix. Da hierdurch i.d.R. kein zusätzliches Traggerüst entsteht, entspricht das Werkstoffmodell demjenigen von Injektionsgut geringerer Festigkeit. Besteht das Hohlraumvolumen überwiegend aus wenigen Hohlräumen größeren Volumens, entstehen durch die Injektion künstliche Starrkörper in der Mörtelmatrix. Das Injektionsvolumen ist dann im Werkstoffmodell dem Steinvolumen zuzuordnen [65].

Nach Untersuchungen von Franke und Mitarbeitern [11] kann die Festigkeit bei Hohlräumen in der Vermörtelung historischen Mauerwerks (siehe Schadbild, S. 7 links) durch Injektion bis zu 70 % gesteigert werden. Die Potenzformel nach Mann [30] gestattet eine Abschätzung der erreichbaren Druckfestigkeitssteigerung durch Mauerwerksinjektion.

Penetration

Die Penetration kann die kohäsiven Eigenschaften verwitterter, poröser Mörtelgefüge verbessern. Dabei wird unterschieden, ob ein Haufwerk, z.B. ein stark verwitterter Fugenmörtel oder ein poröser Feststoff, z.B. ein poröser Naturstein, penetriert werden soll. Bei der Haufwerkspenetration ist das erhärtende Injektionsgut festigkeitsbildend. Bei der Feststoffpenetration ist die Bindemittelmatrix, z.B. des Natursteins, festigkeitsbildend. Durch das Injektionsgut wird das Bindemittelvolumen erhöht.

Vernadelung

Die Vernadelung dient der Aufnahme von Horizontalkräften im Mauerwerksgefüge. Diese treten primär bei Mauerwerksgefügen mit nicht kohäsiver Innenschale sowie bei kohäsiven Mauerwerksgefügen im Lasteintragungsbereich auf [65].

Die Nadeln, auch Nadelanker genannt, sind Stäbe aus Betonrippenstahl i.d.R. der Stahlgüte 420/500. Die Nadeln werden mittig mit Hilfe von Abstandshaltern in die Bohrungen des Mauerwerks eingelegt [7]. Der Hohlraum zwischen dem Nadelanker

und dem Mauerwerk wird mit Injektionsgut, i.d.R. mit einer geeigneten Zementsuspension, ausgefüllt.

Nach Dahmann [7] kann durch eine enge und steife Vernadelung die Tragfähigkeit dreischaliger Mauerwerksgefüge signifikant erhöht werden. Die Lastübertragung zwischen Mauerwerksschale und Nadel erfolgt über die Verbundwirkung des Injektionsmörtels zum Nadelanker und zum Mauerwerk. Maßgebend für die Wirksamkeit der Vernadelung sind die maximal aufnehmbare Ausziehungskraft und die Federsteifigkeit der Nadel. Diese wiederum hängen von der Stahlgüte und der Profilierung der Nadel, von den mechanischen Eigenschaften des Injektionsmörtels, von der Verbundlänge und von der Querkzugfestigkeit des umgebenden Mauerwerks ab.

Werden, wie allgemein üblich, herkömmliche Baustähle verwendet, ist dem Korrosionsschutz besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Durch Rostbildung kann die notwendige Verbundwirkung stark beeinträchtigt werden. Nach Untersuchungen des SFB 315 ist eine gleichmäßige Überdeckung der Nadel oder des Ankers mit 20 mm Zementstein ausreichend. Um die gleichmäßige Überdeckung zu erzielen, ist es notwendig, Abstandshalter zu verwenden.

Zum Nadelraster werden unter Berücksichtigung der Fließfähigkeit und Steighöhe des Injektionsmörtels folgende Abhängigkeiten zwischen Wanddicke d_m und größtem Nadelabstand a_N angegeben:

$$d_m > 1 \text{ m} \quad \rightarrow \quad a_N = 1 \text{ m}$$

$$d_m < 1 \text{ m} \quad \rightarrow \quad a_N = d_m$$

2.6.3 Injektionsverfahren

Da die Hohlräume und Spalten im Mauerwerk nur durch die Außenschale hindurch erreicht werden können, ist eine erfolgreiche Verfüllung der Fehlstellen im Mauerwerksinneren nur mittels Injektionstechnik nach erfolgter temporärer oder dauerhafter Fugenkonsolidierung der Außenschale möglich. Ist die Außenschale weitgehend intakt und tritt die Sicherung des Mauerwerksgefüges insgesamt in den Vordergrund, ist es möglich, die Fugen nur temporär, d.h. für die Dauer der Injektionsarbeiten abzudichten, damit das Injektionsgut nicht ausläuft. Ein derartiger temporärer Fugenschluß kann z.B. mit Lehm erfolgen, der sich später leicht wieder entfernen läßt. Weit häufiger wird jedoch vor Injektionsarbeiten die gesamte Außenschale saniert, was meistens nicht nur die Fugenkonsolidierung (Fugenausräumen, -reinigen, Neuverfugung mit einem angepaßten Mörtel), sondern auch die Steinrestaurierung (Steinfestigung, -ergänzung, -austausch) beinhaltet. Eine Reinigung der Außenschale ist erst nach Abschluß der Injektionsarbeiten zu empfehlen. Damit das Injektionsgut die Außenschale durchdringen kann, werden entsprechende Öffnungen benötigt, die je nach Ziel der Injektion (Spalt- oder Hohlrauminjektion im Mauerwerkskern) unterschiedlich tief ins Mauerwerk hineinragen. Zu diesem Zweck werden Injektionspacker in Bohrlöcher gesetzt, in Fugen des Mauerwerkes eingeschlagen oder in vorhandene Öffnungen (z.B. Spalten oder Risse) eingeklebt. Der

Durchmesser der Packer ist abhängig von der Art und dem Fließverhalten des Injektionsgutes (deutliche Unterschiede bestehen z.B. zwischen mineralischen und kunstharzgebundenen Systemen), dem Ausmaß der Fehlstelle (Riß oder Hohlraum) und vom Injektionsdruck, mit dem das zu sanierende Mauerwerk maximal belastet werden darf. Da es sich bei den Injektionsgütern um Nicht-newtonsche-Flüssigkeiten handelt, d.h. zum Fließen muß erst eine bestimmte Spannung (=Fließgrenze, siehe Punkt 4.5.5) überwunden werden, ist ein bestimmter Druck notwendig, damit das Injektionsgut seinen „Bestimmungsort“ erreicht. Je nach Höhe des Druckes unterscheidet man Niederdruckverfahren (≤ 6 bar) und Hochdruckverfahren.

Die Lage und das Raster der Packer richten sich nach dem Hohlraumvolumen und der Verteilung der Hohlräume über das gesamte zu sanierende Mauerwerk. Im allgemeinen beträgt der Packerabstand ca. 0,5 m. Je nach Zugängigkeit der Mauerwerksoberfläche (z.B. findet man bei Umfassungsmauern an mittelalterlichen Burgen häufig, daß die Mauer zur Burghofseite erdaufgefüllt ist und deshalb leichter von der Außenschale hangseitig injizierbar ist) und Lage der Hohlräume kann die Injektion wahlweise von beiden Außenschalen erfolgen. Injiziert wird i.d.R. von unten nach oben, d.h. vom Mauerfuß in Richtung der Mauerkrone. Je nach Objektbedingungen und vorhandener Gerätetechnik (Injektionsschläuche und Pumpen) wird nur ein Packer oder werden mehrere Packer auf einer Ebene gleichzeitig über das Pumpsystem mit Injektionsgut beaufschlagt.

Die Füllung der Hohlräume mit Injektionsgut ist durch den Druckanstieg im Injektionsschlauch am Packer feststellbar. Eine günstige Überwachungsmöglichkeit bieten hier Packer mit Druckmeßgeräten. Darüber hinaus äußert sich die Füllung von Spalten oder Hohlräumen häufig auch darin, daß aus höherliegenden Packer- oder anderen Mauerwerksöffnungen Injektionsgut austritt.

Das Hohlraumvolumen liegt bei historischen Mauerwerken je nach Mauersteinart, Mörtelanteil, Mauerwerksgefüge, -verband sowie Ausmaß der Schädigung durch die vielfältigsten Einflüsse (siehe Punkte 2.1 bis 2.4) zwischen 5 und 15 Vol%.

2.6.4 Mineralische Injektionsmörtel

BOWEN beschreibt in [3] folgende 3 Grundtypen von Injektionsmaterialien:

- a) Suspensionen: sind Dispersionen von unlöslichen Feststoffteilchen (Korngröße bis zu kolloiden Dimensionen) in Flüssigkeiten, z.B. PZ oder Ton oder Zement-Ton-Gemische in Wasser.
- b) Lösungen (solutions): sind homogene Gemische verschiedener Stoffe, wobei alle Teilvolumina eine gleichartige Zusammensetzung aufweisen. Zu dieser Kategorie zählen die chemischen Injektionen z.B. mit Wasserglaslösung.
- c) Emulsionen: sind disperse Systeme von zwei oder mehreren miteinander nicht mischbaren Flüssigkeiten. Die eine der flüssigen Phasen bildet dabei das

Dispersionsmittel, in dem die andere Phase in Form feiner Tröpfchen verteilt ist,

z.B. feinstverteiltes Bitumen in Wasser.

Wie bereits unter 2.6.1. erwähnt, werden je nach Sanierungsziel anorganische, mineralische und organische, z.B. kunstharzgebundene Mörtel, z.T. auch siliciumorganische Systeme injiziert. Da bei der Spaltinjektion (Hinterfüllung), Hohlrauminjektion und der Verpressung von Ankerkanälen die mineralischen Mörtel überwiegen, sollen sich die weiteren Ausführungen auf diese Gruppe beschränken.

Nachdem sich Suspensionen aus Kalk und Ton aus den Anfangsphasen der Injektion als nicht dauerhaft erwiesen haben, wurde der Zement das dominierende Bindemittel bei der Mauerwerksinjektion.

Für die Mauerwerksinjektion eignen sich alle handelsüblichen Zemente und hochhydraulische Kalke, auch mit mineralischen Zusätzen, z.B. Quarzmehl, Kalksteinmehl oder Traß. Tonerdezemente sind nicht geeignet.

Der hohe Anteil von gipshaltigen Mörteln in historischen Bauwerken räumt den Zementen mit hohem Sulfatwiderstand (HS - Zement), dem Sulfathüttenzement und dem früher hergestellten Erzzement eine besondere Stellung unter den Bindemitteln für Verpressungen ein. Bei Verwendung dieser Zementarten lassen sich in der Regel Treibschäden durch Ettringit- und/oder Thaumasitbildung auf ein vertretbares Restrisiko minimieren. Ein Nachteil der Erz- und hochsulfatwiderstandsfähigen Portlandzemente ist jedoch ihre dunkle Farbe, so daß beim Austritt von Injektionsmörtel aus dem Mauerwerk, was nie völlig ausgeschlossen werden kann, die Oberfläche umgehend sorgfältig gereinigt werden muß.

Auch hochhydraulische Kalke können als Bindemittel für Verpreßmaterial zum Einsatz kommen. Wegen ihres hohen Aluminat - Anteils neigen sie jedoch bei Kontakt mit Gips zum Treiben. Außerdem ist die im Mauerwerk erreichte Festigkeit wesentlich geringer als bei Zementen, und sie weisen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber ständiger Durchfeuchtung auf.

Während Mauermörtel- und Betonrezepturen seit Beginn des 20. Jahrhunderts häufig anhand von Bauunterlagen, Prüfberichten und Fachbüchern dokumentiert wurden bzw. ihre Zusammensetzung durch nachträgliche Untersuchungen ermittelt wurde, ist die Beschreibung von Rezepturen für Injektionsmörtel eher selten. Die nachträgliche Untersuchung gestaltet sich insofern schwierig, da zur Gewinnung von ausreichend Probematerial ein grober Eingriff in die bestehende, häufig historisch wertvolle Bausubstanz notwendig ist.

Die erste umfassende Arbeit auf diesem Gebiet wurde im Rahmen des SFB 315 geleistet [8]. Zur Beschreibung des Sanierungserfolges sowie der Dauerhaftigkeit der verwendeten Materialien wurden aus 5 Objekten, bei denen in den siebziger Jahren Sanierungsarbeiten durch Vernadelung und Injektion erfolgten, Proben entnommen und umfassend chemisch-mineralogisch sowie hinsichtlich ihrer Porositätskennwerte untersucht. Die Proben stammen aus zwei Bauwerken in Baden - Württemberg (A und B) und drei Bauwerken in Norddeutschland (C bis E). Die Proben A und B wurden

naßgebohrt, wobei einige Stahlnadeln einschließlich des umgebenden Verpreßmörtels und Teile der angrenzenden Mauerwerksbaustoffe herausgebohrt wurden. Die Proben C bis E fielen bei Abbruch- und Sanierungsarbeiten an. Das exakte Alter der Injektionsmörtel ist nicht bekannt. Das erhärtete Verpreßgut besteht bei allen untersuchten Proben aus fast reinem Zementstein. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über ausgewählte Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Die Tabelle 2 faßt die wichtigsten Ergebnisse der Literaturlauswertung zum Thema Injektionsmörtelrezepturen über einen Zeitraum von ca. 120 Jahren zusammen.

Die Tabelle 3 dokumentiert ausgewählte Ergebnisse eigener Untersuchungen an Mörteln, die zwischen 1928 und ca. 1960 in verschiedene Objekte Thüringens injiziert wurden. Die Bilder 11 bis 15 zeigen den Verbund einer ca. 60 Jahre alten Thuramentinjektion zum Fugenmörtel und Naturstein (u.a. Schaumkalk) an Bohrkernen aus einer Eisenbahnbrücke in Oberroßla (siehe auch Tabelle 3). Trotz der ca. 30 µm dicken Calcitschicht an der Phasengrenzfläche (Bild 14) ist keine Beeinträchtigung des Verbundes nachweisbar. Der Stofftransport erfolgte mit hoher Wahrscheinlichkeit vom kalkreichen Fugenmörtel aus in Richtung des Thuraments, wobei Calcit nicht nur an der Phasengrenzfläche, sondern auch in den Poren des Thuraments kristallisierte.

Ebenfalls nahtlos ist der Verbund zwischen dem Thuramentinjektionsmörtel und dem Schaumkalk (Bild 15). Hier wurden keine Grenzflächenreaktionen nachgewiesen.

Tabelle 1: Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an injiziertem Mauerwerk nach [8]

Bauwerk	Mauerstein/Mörtel	Erscheinungsbild sanierter Bereich	injizierte Zementart	Porosität	Beurteilung
A	Kalkstein Kalk	Nadeln intakt	PZ hoher K ₂ O-Gehalt	gering, überwiegend Gelporen	Sanierung erfolgreich, Stahlnadeln nicht korrodiert
B	Kalkstein Kalk	Nadeln intakt, Ettringit	PZ- HS	mittlere Porosität, Gelporen, feine Kapillarporen (10 - 30 nm)	Sanierung erfolgreich, Ettringitbildung in unkrit. Menge, Stahlnadeln nicht korrodiert
C	Kalkstein Kalk	Nadeln erheblich korrodiert, Zementstein stark carbonatisiert	EPZ	hohe Porosität bimodale Verteilung, feine Kapillarporen (10-30 nm), Großporen (100-500 nm)	Erhebliche Schäden, zu hoher W/Z-Wert kann Ursache sein
D	Ziegel Gips/Kalk	Nadeln intakt, Thaumasit	PZ-HS	mittlere Porosität, feine Kapillarporen	Sanierung erfolgreich, Ettringitbildung in unkrit. Menge, Stahlnadeln nicht korrodiert
E	Ziegel Gips/Kalk	Nadeln intakt,	HOZ	mittlere Porosität, feine	Sanierung nur z.T. erfolgreich,

		Thaumasit		Kapillarporen	Ettringit beeinträchtigt Kraftschluß zwischen Verpreßgut und Mauerwerk
--	--	-----------	--	---------------	---

Tabelle 2: Injektionsmörtelrezepturen - Literaturlauswertung

Autor/Baumeister, Jahr, Quelle	Objekt, Mauerwerkskomponenten	Sanierungsziel	Rezeptur	Sanierungserfolg/Besonderheiten
Daser, 1871	Forst-Tunnel der württemb. Schwarzwaldbahn, Naturstein	Tunnelabdichtung	5 T Zement, 4 T Wasser	Injektion über „Löcher“ (Ø 4 cm) in den Lagerfugen
Lütjohan [27], Wolfsholz, 1906	Eisenbahnbrücke über Kaiser-Wilhelm-Kanal bei Osterröfeld	Schließen von Rissen und „klaffenden Fugen“ unter Wasser nach einer Havarie, Wiederherstellung der Standsicherheit eines Auflagerpfeilers	Zementauswahl unter Beachtung „nachteiliger Einwirkungen des salzhaltigen Kanalwassers auf die Bindekraft des Zementes“ Zement und gesiebter, scharfkantiger Sand im MV 1 : 1 1 RT Wasser auf 1 RT Trockenmörtel	Abdichten der Fugen und Risse durch Holzkeile und Werg durch Taucher, Einsatz fortschrittlicher Gerätetechnik (Entwicklung durch A. Wolfsholz)
Wolfsholz [71], 1910	Eisenbahnbrücke über Mittel- und Südkanal in Hamburg, Ziegelmauerwerk	Schließen von Rissen im Mauerwerk, die durch „Nachgeben“ der Pfahlgründung entstanden	Zement ohne Sandzusatz Verbrauch: 25 kg/m ³ Mauerwerk	Sanierungsziel erreicht, keine Risse in den „angelegten Zementbändern“
Rüth [20], 1929-30	Johanniskirche in Ellrich Dolomit- und Gipsstein, Gipsmörtel Brand 1907: Loslösen des Kernmauerwerks vom Verblendmauerwerk, Löschwassere Wirkung auf Baugrund, Fundamente und Mauerwerk, z.T. thermische Entwässerung des Gipses	Turmsicherung durch Mauerwerksverpressung, Fundamentverbreiterung	Kernmauerwerk: Erzzement „Hemmoor“ MV 1 : 2 mit Zuschlag: Nordhäuser Sand und Heldrunger Sand je 50 % Zusatz Sika Ib Verbrauch: 30 t Erzzement + 52 m ³ Sand → ca. 10-12 Vol% Hohlräume	1931 erneute Rißbildung weiterhin Fundament- und Baugrundschwäche, Schwächung des Mauerwerks durch Treibmineralbildung (Ettringit und Thaumazit), Wechselwirkung zwischen Injektionsgut, Originalmörtel und Dolomit

Autor/Baumeister, Jahr, Quelle	Objekt, Mauerwerks- komponenten	Sanierungsziel	Rezeptur	Sanierungserfolg/Besonder- heiten
Rüth [43],1928	Dom zu Nordhausen, „Gipsmörtelmauerwerk“	technische Sicherungsmaßnahmen am Fundament, den Strebepfeilern und an der Dachkonstruktion	Zementmörtelinjektion nach Pfeilerfundamentverstärkung: Zement „Dyckerhoff- Doppel“ Zusatz Sika Ib Zuschlag: ausgesiebter Sand (Nordhäuser Kies, Teutschenthaler Sand) „Variation der Mischungs- verhältnisse hinsichtlich Sand-zusatz und Korngröße in Anpassung an Fugenstärke, Risse und Hohlräume“ Wandfundamente: Erzzement „Hemmoor“ und Zuschlag MV 1:6 ohne Sika	„gleichlaufende örtliche statische und konstruktive Untersuchungen des Verfassers“
Gemert und Mitarbeiter [76], 1992-1994	Turm der Marienbasilika in Tongeren, Belgien	Verstärkung des Schalenmauerwerks der Pfeiler	Zementinjektion: 100kg CEM III A 42,5 + 2 kg Bentonit + 1,5 kg Superplasticizer + 67,7 kg Wasser Epoxidharzinjektion: Kombination aus Epikote 240 und Epikure 114	80 l Injektionsvolumen/m ³ , Injektionsdruck 2,5 bar Sanierungsziel wurde erreicht → Nachweis mittels eines speziellen geoelektrischen Verfahrens

Tabelle 3: Untersuchung der Zusammensetzung von Injektionsmörteln unterschiedlicher Objekte

Objekt, Mauerwerkskomponenten	Beschreibung des beprobten Injektionsmörtels	Chemische Zusammensetzung (GV-frei) in %	Mineralogische Zusammensetzung/Besonderheiten
Runneburg in Weißensee Gips-/Anhydritgestein, Sandstein, Travertin, Gipsmörtel	ca. 13 Jahre alt, dunkelgrau bis blauschwarz, sehr fest, spröde, ohne Zuschläge	CaO = 61,1 ... 63,2 SiO ₂ = 21,1 ... 21,5 Al ₂ O ₃ = 6,5 ... 4,3 Fe ₂ O ₃ = 2,0 ... 2,3 MgO = 3,6 ... 3,3 K ₂ O = 0,62 Na ₂ O = 0,55 ... 0,3 SO ₃ = 4,2 ... 18,6	CaCO ₃ ca. 35 % Ca(OH) ₂ ca. 5 % CaSO ₄ ·2H ₂ O ca. 2 % Ettringit ca. 10 % C-S-H-Phasen ca. 40 % → trotz des massiven Vorhandenseins von Gips wurde ein C ₃ A-reicher Zement eingesetzt
Johanniskirche in Ellrich Dolomit- und Gipsgestein, Gipsmörtel	ca. 65 Jahre alt, dunkelgrau, sehr fest, Zuschläge bis 1 mm Erzzement: KÜHL in [46] SCHOCH [46] CaO = 61,91 65,06 SiO ₂ = 24,61 20,18 Al ₂ O ₃ = 1,35 3,47 Fe ₂ O ₃ = 7,73 8,03 MgO = 0,79 0,48 SO ₃ = 1,46 k.A. TM = 0,17 0,43	CaO = 31,0 SiO ₂ = 55,9 Al ₂ O ₃ = 4,1 Fe ₂ O ₃ = 3,2 MgO = 0,25 K ₂ O = 0,74 Na ₂ O = 0,2 SO ₃ = 4,6 TM = 1,28 ! Neben dem erhöhten Anteil an SiO ₂ (Sika Ib) ist auch der Al ₂ O ₃ -Gehalt im Verhältnis zum Fe ₂ O ₃ für Erzzement zu hoch (= Gefährdung bzgl. Ettringitbildung).	CaCO ₃ wenig - mittel Ca(OH) ₂ wenig Ettringit/Thaumasit wenig C-S-H-Phasen viel → Erzzement „Hemmoor“ mit Zusatz von Sika Ib Die Herkunft des erhöhten Al ₂ O ₃ -Anteiles ist nicht bekannt. Die Natursteine scheiden als Lieferant von mobilem Al ₂ O ₃ aus.

Objekt, Mauerwerkskomponenten	Beschreibung des beprobten Injektionsmörtels	Chemische Zusammensetzung (GV-frei) in %		Mineralogische Zusammensetzung/Besonderheiten	
		1	2	1	2
Eisenbahnbrücke in Oberroßla/Thüringen Mischmauerwerk (Kalksteine und Ziegel), ziegelbrechsandhaltiger hydraulischer Kalkmörtel	1. Injektionsphase vor 1945: braun, sehr dicht; $\beta_D = 15 \text{ N/mm}^2$, Bilder 11 bis 15	CaO = 46,4	44,7	CaCO ₃	viel mittel
	2. Injektionsphase um 1960 dunkelgrau bis blau-schwarz, keine Zuschläge erkennbar; $\beta_D = 100 \text{ N/mm}^2$	SiO ₂ = 21,6	28,3	Ca(OH) ₂	nein mittel
		Al ₂ O ₃ = 6,0	11,9	Ettringit	wenig wenig
		Fe ₂ O ₃ = 5,1	1,6	C-S-H-Phasen	mittel viel
		MgO = 18,0	6,9	Ankerit	wenig nein
		K ₂ O = 0,9	0,2	Hydrotalcit**)	wenig wenig
		Na ₂ O = 0,2	0,2		
		SO ₃ = 2,0	5,1		
				1 = Thuramentmörtel *) (siehe Bilder 11 ff.) 2 = hüttensandhaltiger Zementstein, wahrscheinlich mit geringem Quarzmehlzusatz	

*) ... Erläuterung siehe 2.6.1.

***) ... CaO bzw. MgO- und Al₂O₃/Fe₂O₃-haltige Carbonathydratphase, die typisch für erhärtete hüttensandreiche Bindemittel ist

Bild 11: Bohrkern aus der Eisenbahnbrücke in Oberroßla



Bild 12: Thuramentinjektion im Kontakt zum Fugenmörtel aus hydraulischem Kalk
(Maßstabsbalken = 2,5 mm)

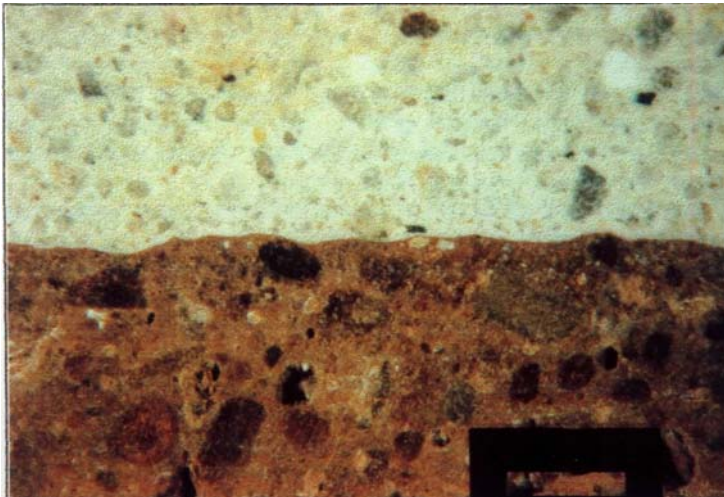


Bild 13: Kontaktbereich Thurament-Fugenmörtel POLMI 30× Pol. + ,
Oberfläche des Fugenmörtels ist karbonatisiert (heller Bereich)

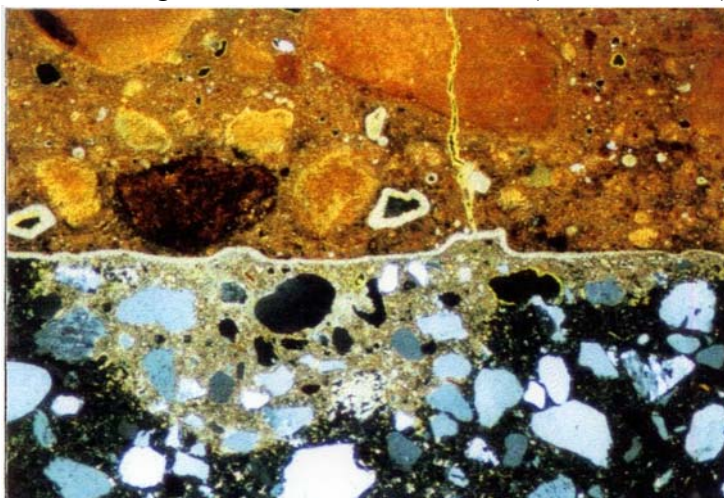


Bild 14: Detail aus Bild 13; Calcitkristalle an der Phasengrenzfläche
und in einer Pore des Thuramentinjektionsmörtels POLMI 120× Pol. +

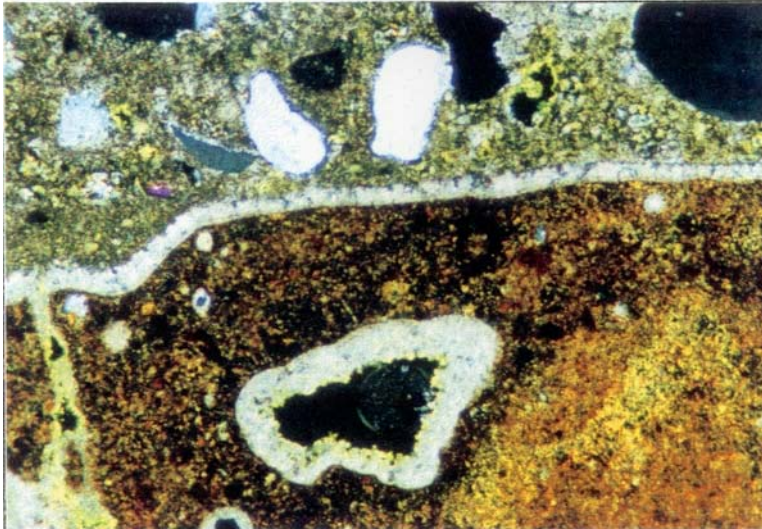
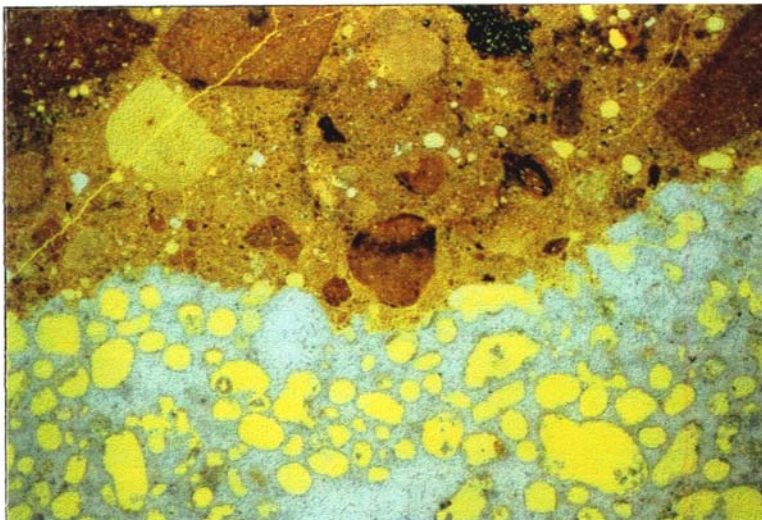


Bild 15: Kontaktbereich Thurament-Schaumkalk (untere Bildhälfte)
POLMI 30× Pol. =



3 Wirkung bauschädlicher Salze in historischem Mauerwerk

Da die Salze in Verbindung mit Feuchtigkeit als Verursacher von Schäden an den Mauerwerksbaustoffen eine große Rolle spielen, werden die Herkunft der Salze, die Feuchtetransportprozesse in den Baustoffen, die Schadensbilder und -ursachen sowie Möglichkeiten zur Sanierung salzbelasteter Mauerwerke näher beschrieben.

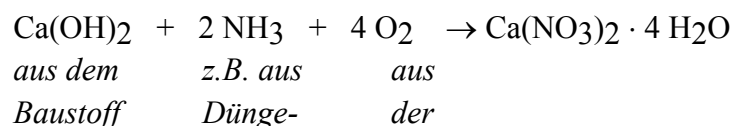
3.1 Herkunft der Salze und Schädigungsmechanismen

Salze sind im chemischen Sinne Neutralisationsprodukte von Säuren und Laugen. Sie sind in allen mineralischen Baustoffen enthalten. In Abhängigkeit von ihren Eigenschaften können sie positiv wirken, in dem sie den Bestand der Baustoffe z.B. als Bindemittel gewährleisten (=Eigensalze) oder durch mögliche bauschädigende Reaktionen die Bausubstanz beeinträchtigen. Dabei kann chemisch - mineralogisch betrachtet ein und dasselbe Salz beide Wirkungen ausüben. So agiert z.B. CaCO_3 (Calciumcarbonat, Calcit) als Festigkeitsbildner bei Kalkmörteln, während es in Form von Ausblühungen oder Aussinterungen auf Beton negative Auswirkungen hat.

Salze können auf sehr unterschiedliche Weise in den Baustoff gelangen, z.B.

- durch den Herstellungsprozeß der Baustoffe (Eigensalze des Baustoffs): als Bestandteile des Bindemittels, des Zuschlages/Natursteines, des Ziegels oder der Zusatzmittel
- infolge von Kapillartransport durch aufsteigende Mauerfeuchte aus dem Baugrund
- durch Umwelteinflüsse, z.B. Vergipsung von Bauwerksoberflächen infolge der SO_2 - Belastung der Luft
- durch Spritzwassereinwirkung mit Streusalzen
- durch salzhaltige Wässer (z.B. Meerwasser) und Böden
- durch Verwendung von salzhaltigem Anmachwasser oder Sand und Kies aus dem Meer bei der Frischmörtel - / Frischbetonherstellung
- durch Kontakt zu Fäkalien (Misthaufen, Dunggruben)
- durch säurebildende Mikroorganismen (Thiobacillus, Nitrifikanten)
- durch ungeschützte Lagerung von salzhaltigen Schüttgütern, z.B. Düngesalzen
- durch Fassadenreinigungen in Verbindung mit Säuren, z.B. durch Absäuern von Ausblühungen auf Ziegelsichtmauerwerk
- durch Sanierungsmaßnahmen, z.B. mit Alkaliwassergläsern
- durch Unverträglichkeit beim Kontakt historischer und moderner Baustoffe

Das folgende Beispiel veranschaulicht die Bildung des häufig angetroffenen Mauersalpeters, der durch die Einwirkung stickstoffhaltiger Verbindungen (z.B. Ammoniak oder Harnstoff) auf kalkhaltige Baustoffe in Gegenwart des Luftsauerstoffes entsteht:



mitteln Luft

In Verbindung mit den Salzen können folgende Schadensmechanismen in den Baustoffen wirksam werden:

- (1) Treibender Angriff
 - Kristallisationsschäden
 - Hydratationsschäden
- (2) Lösender Angriff
 - z.B. durch Schwefelsäure (“saurer Regen”)
- (3) Schäden in Verbindung mit Frost
 - Frost - Tausalz - Angriff
- (4) Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme
 - salzabhängige Wasseraufnahme der Baustoffe aus der Umgebungsluft
 - Einfluß auf die hygrische Dehnung von Baustoffen (Dehnung ϵ_{hyg} in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit)
- (5) Spannungskorrosion
 - mechanisch und chemisch (hier durch Salze) beanspruchte Baustoffe haben eine kürzere Lebensdauer als rein mechanisch beanspruchte

3.2 Wichtige bauschädliche Salze

Die bauschädlichen Salze stammen im wesentlichen aus den Gruppen der Sulfate, Nitrate, Chloride und Carbonate, wobei die Sulfate mit ca. 80 % den überwiegenden Teil ausmachen. Während die Kationen größtenteils aus dem Baumaterial selbst stammen, werden die Anionen meist durch äußere Einflüsse eingetragen. Die Kationen der Salze werden fast ausschließlich von Alkali-(Na, K) und Erdalkalielelementen (Ca, Mg) gestellt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die wichtigsten bauschädlichen Salze mit ihren chemischen, Mineral- und Trivialnamen.

Das gemeinsame Vorhandensein verschiedener Salze mit der Möglichkeit der Bildung von Doppelsalzen und Hydraten macht Salzlösungen in partiell wassergefüllten porösen Systemen zu sehr komplexen Mehrstoff - Mehrphasen - Systemen, deren Verhalten noch weitgehend unerforscht ist. Nach STEIGER [55] ergeben sich dadurch u.a. Veränderungen der Wasseraufnahme, der Löslichkeiten und der Wasseraktivität.

Tabelle 4: Wichtige bauschädliche Salze

Verbindung	Bezeichnung (chemisch, Mineralname, Trivialname)
1. Sulfate	
CaSO ₄	Calciumsulfat, Anhydrit
CaSO ₄ ·1/2 H ₂ O	Calciumsulfathalbhydrat, Bassanit
CaSO ₄ ·2 H ₂ O	Calciumsulfatdihydrat, Gips
3 CaO·Al ₂ O ₃ ·3 CaSO ₄ ·32 H ₂ O	Tricalciumaluminattrisulfathydrat, Ettringit, Trisulfat
CaSiO ₃ ·CaCO ₃ ·CaSO ₄ ·14 H ₂ O	Calciumsilicatcarbonatsulfathydrat, Thaumazit
Ca ₆ Al _{1,5} (SO ₄ ,CO ₃ ,SiO ₂) ₃ OH _{10,5}	Calciumaluminatsilicatcarbonathydroxidhydrat, Woodfordit
Na ₂ SO ₄	Natriumsulfat, Thenardit
Na ₂ SO ₄ ·10 H ₂ O	Natriumsulfathydrat, Mirabilit, Glaubersalz
K ₂ SO ₄	Kaliumsulfat, Arcanit
K ₃ Na (SO ₄) ₂ = K ₂ SO ₄ ·(K,Na)SO ₄	Kalium - Natriumdoppelsulfat, Aphtitalit, Glaserit
K ₂ Ca ₂ (SO ₄) ₃ = K ₂ SO ₄ ·2 CaSO ₄	Kalium - Calciumdoppelsulfat, Calciumlangbeinit
CaNa ₂ (SO ₄) ₂	Calcium - Natriumdoppelsulfat, Glauberit
CaNa ₂ (SO ₄) ₂ ·6 H ₂ O	Calcium - Natriumdoppelsulfat-hydrat, Hydroglauberit
K ₂ Ca (SO ₄) ₂ ·H ₂ O	Calcium - Kaliumdoppelsulfathydrat, Syngenit
K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·4 H ₂ O	Kalium - Magnesiumsulfathydrat, Leonit
K ₂ Mg (SO ₄) ₂ ·6 H ₂ O	Magnesium - Kaliumdoppelsulfathydrat, Schönit, Picromerit
K ₂ Ca ₅ (SO ₄) ₆ ·H ₂ O	Kalium - Calciumsulfathydrat, Goergeyit, Micheewit
Na ₂ Mg (SO ₄) ₂ ·4 H ₂ O	Magnesium - Natriumdoppelsulfathydrat, Bloedit, Astrakanit
MgSO ₄ ·H ₂ O	Magnesiumsulfathydrat, Kieserit
MgSO ₄ ·4 H ₂ O	Magnesiumsulfathydrat, Starkeyit
MgSO ₄ ·6 H ₂ O	Magnesiumsulfathydrat, Hexahydrat
MgSO ₄ ·7 H ₂ O	Magnesiumsulfathydrat, Epsomit, Bittersalz
FeSO ₄ ·7 H ₂ O	Eisensulfathydrat, Melanterit, Eisenvitriol
Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18 H ₂ O	Aluminiumsulfathydrat, Alunogen
K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄ ·2 H ₂ O	Kalium - Calcium - Magnesiumsulfatdihydrat, Polykalit
PbSO ₄	Bleisulfat, Anglesit
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammoniumsulfat, Arascanit
Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ ·2 H ₂ O	Natrium - Calciumsulfatdihydrat, Engstenit
K ₃ Na ₇ Mg ₂ (SO ₄) ₆ (NO ₃) ₂ ·6 H ₂ O	Humberstonit
K ₃ Na ₉ Fe(SO ₄) ₆ (OH) ₃ ·9 H ₂ O	Kalium - Natrium - Eisensulfathydroxidhydrat, Ungemachit

Verbindung	Bezeichnung (chemisch, Mineralname, Trivialname)
<u>2. Nitrate</u>	
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Calciumnitrat
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	Calciumnitratthydrat
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Calciumnitratthydrat, Nitrocalcit, Kalksalpeter, auch Mauersalpeter
KNO_3	Kaliumnitrat, Nitrokalit, Kalisalpeter, auch Kehrsalpeter
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Magnesiumnitratthydrat, Nitromagnesit
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	Magnesiumnitratthydrat, Magnesiumsalpeter
NaNO_3	Natriumnitrat, Nitronatrit
$\text{Na}_3\text{NO}_3\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Natriumnitratsulfathydrat, Darapskit
NH_4NO_3	Ammoniumnitrat, Nitranit
<u>3. Chloride</u>	
$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	Tricalciumaluminatcalciumchloridthydrat, Friedelsches Salz
$\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	Calciumchloridthydrat
$\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Calciumchlorididthydrat
NaCl	Natriumchlorid, Halit, Steinsalz, Kochsalz
$\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	Magnesiumchloridthydrat, Bischoffit
KCl	Kaliumchlorid, Sylvin
NH_4Cl	Ammoniumchlorid, Salmiak
PbCl_2	Bleichlorid, Cotumit
<u>4. Carbonate</u>	
CaCO_3	Calciumcarbonat, Calcit, selten auch Aragonit oder Vaterit
K_2CO_3	Kaliumcarbonat, Pottasche
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	Natriumcarbonathydrat, Natrit, Soda, Natron
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Natriumcarbonathydrat, Thermonatrit
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	Natriumcarbonathydrat
NaHCO_3	Natriumhydrogencarbonat, Nahcolit
$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Natriumhydrogencarbonathydrat, Trona
MgCO_3	Magnesiumcarbonat, Magnesit
$\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Magnesium - Aluminiumcarbonathydroxidthydrat, Hydrocalcit
$\text{Mg}_6\text{Fe}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Magnesium - Eisencarbonathydroxidthydrat, Sjogrenit, Pyroaurit
$\text{Mg}_{10}\text{Fe}_2(\text{OH})_{24}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Magnesium - Eisencarbonathydroxidthydrat, Coalingit
$\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$	Calcium - (Eisen, Magnesium)carbonat, Ankerit

3.3 Feuchtetransport in porösen Baustoffen und Löslichkeit der Salze

Grundvoraussetzungen für den Salztransport sind ein kapillarporöser Baustoff und die Gegenwart von Wasser bzw. Feuchtigkeit. Dabei kann die Feuchte vom Baustoff in folgender Weise aufgenommen werden:

- kapillare Wasseraufnahme
- Wasseraufnahme durch drückendes Sicker- oder Hangwasser bzw. Schlagregen über offenen Poren, Rissen oder Fugen
- hygroskopische Wasseraufnahme
- Wasseraufnahme durch Kondensation
- Wasseraufnahme durch Kapillarkondensation

wobei das Wasser in den ersten beiden Fällen in flüssiger Form und bei den drei letztgenannten über die Gasphase in den Baustoff gelangt.

Dabei ist das Verhalten der Baustoffe gegenüber Wasser nicht nur von der Gesamtporosität, sondern auch von der Art, Form, Größe und Verteilung der Poren abhängig. Nach ROMBERG und SETZER [41] werden z.B. die Poren für Zementstein und Beton in folgende Bereiche eingeteilt:

Mikrogelporen	<	1 nm (vgl. Durchmesser eines H ₂ O-Moleküls: ca. 0,3 nm)
Gelporen (= Mesogelporen)	1 nm ...	10 nm
Kapillarporen	10 nm ...	100 µm
Luftporen	1 µm ...	1 mm

Kapillare Wasseraufnahme

Der wesentliche Transportmechanismus bei porösen Baustoffen ist die kapillare Wasseraufnahme. Sie wird auch als Wasseransaugen bezeichnet, da das Wasser in den Kapillarporen im Baustoff aufsteigt. Dies ist dann möglich, wenn die Adhäsionskraft zwischen Flüssigkeit und Porenwand größer ist als die Kohäsion innerhalb der Flüssigkeit. Dabei wird die kapillare Steighöhe nach folgender Beziehung berechnet:

$$h = \frac{2 \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g}$$

= Oberflächenspannung des Wassers

= Randwinkel des Wassers gegen den Feststoff

r = Radius der Kapillare (m)

= Dichte des Wassers (kg/m³)

g = Erdbeschleunigung (g = 9,81 m/s²)

Beschrieben wird die kapillare Wasseraufnahme der Baustoffe durch den Wasseraufnahmekoeffizienten μ (Bestimmung nach DIN 52617 [A30]).

Wasseraufnahme durch drückendes Sicker- oder Hangwasser bzw. Schlagregen

Unter ungünstigen Bedingungen kann anstehendes Hang- oder Sickerwasser in den Außenbaustoff gedrückt werden. Um die Transportvorgänge mathematisch beschreiben zu können, wird von dem Modell der Strömung von Flüssigkeit in einem horizontal liegenden Rohr mit zylindrischem Querschnitt ausgegangen. Die Gesetzmäßigkeiten dazu wurden von VENZMER [60] näher beschrieben.

Wasseraufnahme durch Kondensation und Kapillarkondensation

Als Kondensation wird der Übergang des Wasserdampfes zum "flüssigen" Wasser bei Überschreitung des Kondensationspunktes ("Taupunkt") bezeichnet. Kapillarkondensation erfolgt vor Erreichen der "Taufkurve", d.h. in einer Kapillare mit dem Radius r tritt bereits bei einem Dampfdruck, der unter dem Sättigungsdampfdruck liegt, Kondensation ein.

Nach den Erkenntnissen über Kapillarkondensation kann nach VENZMER [60] folgende Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Porengröße, die bei dieser Luftfeuchte mit Wasser gefüllt wird, angegeben werden:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{2 \sigma \cos \vartheta}{\rho r R_D T}\right)$$

φ = relative Luftfeuchte

σ = Oberflächenspannung des Wassers in N/m

ϑ = Benetzungswinkel in °

ρ = Dichte des Wassers in kg/dm³

r = Radius der Kapillare in m

R_D = spezifische Gaskonstante des Wasserdampfes in kJ/kg K

T = Temperatur in K

Daraus folgt, daß poröse Baustoffe unter natürlichen Bedingungen immer einen gewissen Anteil an Wasser enthalten ("Ausgleichsfeuchte"), wobei die Materialfeuchte des Baustoffs bei konstanter Temperatur von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt. Diesen Zusammenhang veranschaulichen die Sorptionsisothermen (Sorption = Adsorption + Desorption).

Bei anhaltender Feuchtigkeit wandern die Salze durch Diffusion gemäß des 1. Fickschen Gesetzes (\sqrt{t} - Funktion) entsprechend dem Konzentrationsgefälle, d.h. der Salztransport in Baustoffen erfolgt nach dem \sqrt{t} - Gesetz.

Hygroskopische Wasseraufnahme

Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme bedeutet Wasseraufnahme aus der Umgebungsluft. Dabei nimmt der Baustoff um so mehr Feuchtigkeit auf, je höher die Luftfeuchtigkeit und je höher der Versalzungsgrad des Baustoffs ist.

Der Versalzungsgrad ist in der folgenden Weise definiert:

$$\text{Versalzungsgrad} = \frac{m_S}{m_B} \text{ in mg/g oder in \%}$$

m_S ... Masse an Salz

m_B ... Masse an Baustoff (z.B. Bindemittel oder Ziegel)

Durch das Vorhandensein von Salzen im Baustoff kann *mehr Wasser aus der Umgebungsluft aufgenommen* werden als der *Ausgleichsfeuchtigkeit* des salzfreien Baustoffs entspricht.

Zwischen unterschiedlich stark versalzten Bereichen kann es zusätzlich zum Feuchtetransport durch **Osmose** kommen.

Mechanismen der hygroskopischen Wasseraufnahme

- **Absorption** = gleichmäßiges Eindringen von Gasen in Flüssigkeiten oder Festkörpern
- **Kapillarkondensation** = Kondensation von Dämpfen auf der Oberfläche von benetzbaren Körpern in den kapillaren Hohlräumen poröser Körper (siehe 3.1)
- **Hydratation** = Wasseranlagerung unter Bildung von Hydraten (siehe Hydratationsschäden)

Über den hydratisierten Salzen herrscht ein bestimmter Wasserdampfpartialdruck. Durch Absorption oder Kapillarkondensation wird im Porenraum des Baustoffs - in Gegenwart von Salzen - stets eine geringe Menge an gesättigter Salzlösung vorhanden sein. Das ist bedeutungslos, solange der Dampfdruck im Raum kleiner ist als der Dampfdruck über der gesättigten Lösung. Wenn der Dampfdruck im Raum jedoch größer wird als der über der Lösung, kondensiert der Wasserdampf auf der Salzlösung auf. Dadurch nimmt die Feuchtigkeit im Bauwerk zu, was wiederum zur weiteren Auflösung der vorhandenen Salze führen kann.

Beispiele:

- NaCl > 75,3 % rel. Feuchte:
hygroskopisch gesättigte Lösung, d.h.
verstärkte Feuchtigkeitsaufnahme

- MgSO₄·7 H₂O > 88,6 % rel. Feuchte:
hygroskopisch gesättigte Lösung, d.h. verstärkte
Feuchtigkeitsaufnahme
> 52,5 % rel. Feuchte:
weniger als 7 Moleküle Hydratwasser;
zwischen 52,6 % und 88,6 % rel. Feuchte:
hygroskopisch gesättigte Lösung, d.h. verstärkte
Feuchtigkeitsaufnahme

- Ca(NO₃)₂·4 H₂O > 50,5 % rel. Feuchte:
hygroskopisch gesättigte Lösung, d.h.
verstärkte Feuchtigkeitsaufnahme;
< 50,5 % rel. Feuchte:
weniger als 4 Moleküle Hydratwasser

Hygroskopisch kann u.U. soviel Wasser aufgenommen werden, daß nahezu die Sättigungsfeuchte des Baustoffs erreicht wird.

Die wichtigste Eigenschaft der Salze ist die Löslichkeit, die über die Wirksamkeit des Salzes am Bauwerk entscheidet. D.h. die Eigensalze der Baustoffe, die als Festigkeitsbildner wirken, sollten unlöslich bzw. schwer löslich sein. Mit zunehmender Löslichkeit der Salze nimmt die Möglichkeit einer schädigenden Reaktion zu.

Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über Löslichkeiten einiger wesentlicher bauschädlicher Salze in Abhängigkeit von der Temperatur.

Tabelle 5: Löslichkeiten bauschädlicher Salze in Abhängigkeit von der Temperatur

Salz	Löslichkeit in g Salz / 100 g Wasser		
	0 °C	20 °C	40 °C
<u>1. Sulfate</u>			
CaSO ₄ · 2 H ₂ O	0,176	0,204	0,212
Na ₂ SO ₄	---	---	48,1
Na ₂ SO ₄ · 2 H ₂ O	4,56	19,19	---
K ₂ SO ₄	7,33	11,11	14,79
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	30,05(10 °C)	35,60	45,50
Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O	31,2	36,44	45,60
Vergleich zu schwerlöslichen Sulfaten:			
BaSO ₄	k.A.	2,4 · 10 ⁻⁴	k.A.
PbSO ₄	k.A.	41 · 10 ⁻⁴	k.A.
<u>2. Nitrate</u>			
Ca(NO ₃) ₂	101	129	196
Ca(NO ₃) ₂ · 4 H ₂ O	k.A.	266	k.A.
KNO ₃	13,25	31,66	63,90
Mg(NO ₃) ₂ · 6 H ₂ O	52,80	54,57	57,50
<u>3. Chloride</u>			
CaCl ₂ · 6 H ₂ O	60,30	74,53	---
CaCl ₂ · 2 H ₂ O	---	---	128,10
NaCl	---	35,88	36,42
KCl	28,15	34,24	40,30
<u>4. Carbonate</u>			
CaCO ₃	k.A.	0,0015 (18 °C)	k.A.
K ₂ CO ₃ · 3/2 H ₂ O	105,50	111,50	117,00
Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	---	---	48,90
Na ₂ CO ₃ · 10 H ₂ O	6,86	21,66	---

k.A. ... keine Angaben

--- ... Salz existiert bei diesen Temperaturen nicht

Die *höchste Löslichkeit* der bauschädlichen Salze weist der Mauersalpeter Ca(NO₃)₂ · 4 H₂O mit 2660 g / l bei 20 °C, die *geringste Löslichkeit* das Calciumcarbonat CaCO₃ mit 0,015 g / l bei 18 °C auf. Calciumhydroxid (Portlandit = Ca(OH)₂) besitzt mit 1,7 g / l eine wesentlich höhere Löslichkeit als Calciumcarbonat, woraus die *Auslaugbarkeit* von Mörteln und Betonen resultiert.

3.4 Treibender Angriff

Dazu gehören Kristallisations- und Hydratationsschäden.

Kristallisationsschäden:

Eine häufige Schadensursache stellt die Volumenvergrößerung beim Kristallisationsvorgang, d.h. beim Übergang von der *gelösten* in die *kristallisierte* Form dar. Die Volumenvergrößerung äußert sich im Kristallisationsdruck bzw. linearem Wachstumsdruck. Der Druck ist vergleichbar dem Druck, der entsteht, wenn Wasser gefriert (Volumenzunahme um 10 %). Die sich aus einer Lösung ausscheidenden

Salzkristalle wachsen nur in Richtung der sich ausbildenden Kristallfläche (linearer Wachstumsdruck). Der Kristallisationsdruck ist abhängig von:

- * Molvolumen
- * Temperatur
- * Konzentration der Salze bzw. dem Grad der Übersättigung der Salzlösung im Porenraum des jeweiligen Baustoffes

Berechnung des Kristallisationsdruckes der Salze

$$P_K = \frac{R T}{V_M} \cdot \left(\frac{C}{C_S} \right)$$

P_K = Kristallisationsdruck (N/mm²) T = Temperatur (K)
 V_M = Molvolumen (l) des festen Salzes R = Gaskonstante (J/mol·K)
 C/C_S = Verhältnis der Konzentration der übersättigten Lösung zur Sättigungskonzentration

In Verbindung mit der Kristallisation können Volumenvergrößerungen eintreten, beispielsweise bei der Einwirkung von Schwefelsäure auf Baustoffe. Dabei werden *schwerlösliche* bzw. *unlösliche* Verbindungen in *leichter lösliche* Sulfate umgewandelt. Die folgende Tabelle verdeutlicht die Volumenzunahme für einige Umwandlungsreaktionen .

Tabelle 6: Volumenzunahme bei Umwandlungs- und Hydratationsreaktionen

Ausgangsprodukte	Reaktionsprodukte	Volumenzunahme
CaCO ₃ +H ₂ SO ₄ +2 H ₂ O (Kalkspat)	CaSO ₄ ·2 H ₂ O+CO ₂ +H ₂ O (Gips)	ca. 100 %
MgCO ₃ +H ₂ SO ₄ +7 H ₂ O (Magnesit)	MgSO ₄ ·7 H ₂ O +CO ₂ +H ₂ O (Bittersalz)	ca. 430 %
FeCO ₃ +H ₂ SO ₄ +7 H ₂ O (Eisenspat)	FeSO ₄ ·7 H ₂ O+CO ₂ +H ₂ O (Eisenvitriol)	ca. 480 %
Al ₂ O ₃ +3 H ₂ SO ₄ +15 H ₂ O (Tonerde)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18 H ₂ O (Aluminiumsulfat)	ca. 1400 %
CaSO ₄ ·0,5 H ₂ O+1,5 H ₂ O (Bassanit)	CaSO ₄ ·2 H ₂ O (Gips)	ca. 40 %
MgSO ₄ ·6 H ₂ O+H ₂ O (Hexahydrat)	MgSO ₄ ·7 H ₂ O (Epsomit)	ca. 10 %
MgSO ₄ ·H ₂ O+5 H ₂ O (Kieserit)	MgSO ₄ ·6 H ₂ O (Hexahydrat)	ca. 130 %
Na ₂ SO ₄ +10 H ₂ O (Thenardit)	Na ₂ SO ₄ ·10 H ₂ O (Mirabilit)	ca. 320 %
Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O+9 H ₂ O (Thermonatrit)	Na ₂ CO ₃ ·10 H ₂ O (Soda)	ca. 260 %

Die Größenordnung der Volumenzunahmen (Tabelle 6) und Kristallisationsdrücke (Tabelle 7) veranschaulicht, daß selbst hochwertige Baustoffe durch Salzeinwirkung zerstört werden können. Dabei wird die Baustoffzerstörung nicht durch den Druck bei einer einzigen Auskristallisation eintreten, sondern durch das zyklische Lösen/Kristallisieren, verbunden mit Schwächungen der Korn-Korn-Bindung. Die Bilder 16 und 17 veranschaulichen die mögliche Baustoffzerstörung am Beispiel eines epsomitbelasteten Sandsteins, der durch die Sprengwirkung des Salzes schichtenweise abblättert.

Bild 16: Epsomitkristallisation unterhalb der Sandsteinoberfläche (die oberste Schicht ist

noch vorhanden)



Bild 17: Epsomitkristallisation unterhalb der Sandsteinoberfläche (die oberste Schicht wurde bereits „abgesprengt“)



Tabelle 7: Kristallisationsdrücke ausgewählter Salze nach Sperling und Coke in [68]

Chemische Zusammensetzung	Molvolumen	Kristallisationsdruck [N/mm ²]			
		C/C _S = 2		C/C _S = 10 ^{*)} *	
		0 °C	50 °C	0 °C	50 °C
CaSO ₄ ·1/2 H ₂ O	46	33,9	40,3	112,0	132,5
CaSO ₄ ·2 H ₂ O	55	28,6	33,8	93,8	111,0
MgSO ₄ ·6 H ₂ O	147	12,0	14,3	35,0	41,5
MgSO ₄ ·7H ₂ O	130	10,6	12,7	39,5	49,5
MgSO ₄ · H ₂ O	57	27,6	32,8	91,0	107,9
Na ₂ SO ₄ ·10 H ₂ O	220	7,3	8,4	23,4	27,7
Na ₂ SO ₄	53	29,6	34,9	97,0	115,0
NaCl	28	56,1	66,3	184,5	219,0
Na ₂ CO ₃ ·10 H ₂ O	199	7,9	9,3	25,9	30,8
Na ₂ CO ₃ ·7 H ₂ O	154	10,1	12,1	33,4	36,5
Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	55	28,4	33,7	93,5	110,9

*) extreme Übersättigung

Bei extremer Übersättigung (z.B. C/C_S = 10) wird kein geregeltes Wachstum stattfinden, sondern ein spontanes Auskristallisieren kleiner Salzkristallite.

Hydratationsschäden

Hydratation ist ein Vorgang, bei dem Wasser gebunden wird. Nach Römpp [82] wird die Hydratation als Lösung in Wasser definiert, bei der sich Wassermoleküle an Ionen, Elektronen, Atome, Moleküle oder Kolloide unter Bindung von Hydraten anlagern, wobei die H - OH - Bindung der Wassermoleküle unversehrt bleibt.

Hydratationsdruck ist der Druck, der entsteht, wenn eine wasserfreie bzw. wasserarme Phase bei Feuchtezutritt unter Volumenzunahme in eine wasserreichere Phase übergeht.

Bindung der Wassermoleküle :

- 1) In Form von Kristallwasser auf Gitterplätzen, wie z.B. beim Gips:
 $\text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (molekular gebundenes Wasser)
- 2) Als Teil des Moleküls der entstehenden Verbindung, wie z.B. beim Portlandit:
 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ (konstitutionell gebundenes Wasser)

Viele Salze sind in der Lage, durch Hydratation Wasser anzulagern, d.h. bei gleicher chemischer Zusammensetzung können unterschiedliche Salzphasen vorliegen mit unterschiedlichem Gefährdungspotential.

Die Hydratation ist reversibel, d.h. bei Überschreiten bzw. Unterschreiten einer bestimmten Temperatur (= Hydratationstemperatur) findet eine Wasseranlagerung oder -abgabe statt. Besonders gefährlich sind daher Salze, deren Hydratationstemperatur im Bereich unseres Klimas relativ niedrig liegt, so daß häufige Wechsel (Wasseranlagerung, -abgabe) eintreten können.

Berechnung des Hydratationsdruckes:

Die Gleichung nach MORTENSEN in [60] gibt den Zusammenhang zwischen dem maximal auftretenden Druck und den äußeren Bedingungen wieder.

$$p_{\text{spr}} = \frac{n \cdot R \cdot T}{(V_h - V_a)} \cdot \ln \frac{p_w}{p_w'}$$

- p_{spr} = Sprengdruck [N/mm²]
- R = Molare Gaskonstante [J · mol⁻¹ · K⁻¹]
- T = Absolute Temperatur [K]
- V_h = Molvolumen des hydratisierten Salzes bzw. der höheren Hydratstufe [cm³/mol]
- V_a = Molvolumen des wasserfreien Salzes bzw. der niederen Hydratstufe [cm³/mol]
- p_w = Wasserdampfpartialdruck bei Temperatur T
- p_w' = Wasserdampfpartialdruck über der gesättigten Salzlösung bei Temperatur T
- n = Anzahl der Mole Wasser der nächst höheren Hydratstufe

Der Hydratationsdruck ist, wie die Gleichung zeigt, insbesondere von den Wasserdampfpartialdrücken abhängig. Ist der Wasserdampfpartialdruck p_w , der eine Funktion der relativen Luftfeuchte und der Temperatur ist, kleiner als der Wasserdampfpartialdruck p_w' über einer gesättigten Lösung des betreffenden Salzes, findet eine Hydratation nicht statt, weil $\ln(p_w / p_w') < 0$ ist.

Reaktionsmöglichkeiten einiger bauschädlicher Salze mit Wasser und deren Hydratationstemperaturen:

	150 °C		200 °C	
MgSO ₄ ·7 H ₂ O	###	MgSO ₄ ·6 H ₂ O	###	MgSO ₄ ·1 H ₂ O
	150 °C			
CaSO ₄ ·2 H ₂ O	###	CaSO ₄ ·1/2 H ₂ O		
	32,4 °C			
Na ₂ SO ₄ ·10 H ₂ O	###	Na ₂ SO ₄		
<hr style="border: 1px solid black;"/>				
	30 °C		100 °C	
Ca(NO ₃) ₂ ·4 H ₂ O	###	Ca(NO ₃) ₂ ·3 H ₂ O	###	Ca(NO ₃) ₂

CaCl ₂ ·6 H ₂ O	35 °C ###	CaCl ₂ ·2 H ₂ O	260 °C ###	CaCl ₂
Na ₂ CO ₃ ·10 H ₂ O	32 °C ###	Na ₂ CO ₃ ·7 H ₂ O	35,4 °C ###	Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O

Ähnlich wie bei der Kristallisation ist die Wasseranlagerung bei der Hydratbildung der Salze mit einer Volumenvergrößerung verbunden. Dabei entstehen Drücke in der gleichen Größenordnung wie bei der Kristallisation.

Beispiele für "hydratationsgefährdete, verwitterungsaktive" Salze sind:

- * Calciumnitrat, Mauersalpeter
- * Natriumnitrat, Glaubersalz
- * Natriumcarbonat, Soda

Die Hydratationstemperatur liegt bei diesen Salzen ### 35 °C, weshalb sie wegen des häufigen Umbaus ihrer Kristallstruktur eine ständige Quelle mechanischer Kräfte sind. Tabelle 8 zeigt Hydratationsdrücke in N/mm² für verschiedene Reaktionen in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte.

Tabelle 8: Hydratationsdrücke in N/mm² nach [60]

Relative Luftfeuchte [%]	0 °C	20 °C	60 °C
Reaktion: CaSO ₄ ·1/2 H ₂ O ### CaSO ₄ ·2 H ₂ O			
100	219,0	175,5	92,6
70	160,0	114,5	25,4
50	107,2	57,5	0
Reaktion: MgSO ₄ ·6 H ₂ O ### MgSO ₄ ·7 H ₂ O			
100	14,6	11,7	9,2
70	9,7	6,8	4,0
50	5,0	1,9	0
Reaktion: Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O ### Na ₂ CO ₃ ·7 H ₂ O			
100	93,8	61,1	43,0
80	63,7	28,4	9,4
60	24,3	0	0

Der Hydratationsdruck ist abhängig von der Zahl der angelagerten Wassermoleküle, der Temperatur und der Luftfeuchte. Bei der Hydratation ist zu unterscheiden, ob die Reaktion über die Lösung oder im quasi festen Zustand abläuft. Über die Lösung heißt, daß die wasserärmere Phase gelöst wird und die wasserreichere Phase auskristallisiert. Im quasi festen Zustand heißt, daß das Gitter der wasserärmeren Phase unter

bestimmten Bedingungen zerstört wird und unter Wassereinbau das Gitter der wasserreichen Phase entsteht.

Der Hydratationsdruck wird auch ausgenutzt, um die Qualität von Baustoffen zu prüfen, z.B. in der DIN 52111 "Kristallisationsversuch - Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen" [A15].

Schädigende Treiberscheinungen können auch durch Fällungsreaktionen hervorgerufen werden. Dabei reagieren lösliche Komponenten des Baustoffs mit löslichen Komponenten der anstehenden Salzlösung, wobei unlösliche Produkte entstehen (z.B. Bildung von Ettringit durch Eindringen von Sulfationen in C₃A - haltige bzw. mobiles Al₂O₃ enthaltende Baustoffe). Bei Fällungsreaktionen kommt es selten zum Wachstum weniger großer Kristalle, sondern eher zum Ausfallen kleiner, verfilzter Kristallite [6].

Es können auch nichtkristalline Substanzen, z.B. wasserreiche, amorphe Hydroxide ausfallen, so daß bei Fällungsreaktionen sowohl Kristallisations - als auch Hydratationsdrücke auftreten können.

3.5 Lösender Angriff

Zu den lösenden Angriffen zählen z.B. Angriffe durch Schwefelsäure. Die Schwefelsäure kann wie folgt gebildet werden:

- 1) Bei der Zersetzung vieler organischer Stoffe entsteht H₂S (z.B. in Abwässern), das oberhalb des Wasserpegels zu aggressiver H₂SO₄ oxidiert werden kann.
- 2) SO₂ - Gas, das in vielen Verbrennungsgasen in z.T. erheblichen Konzentrationen enthalten ist, wird in Gegenwart von Feuchtigkeit in schweflige Säure umgewandelt
$$\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$$

und kann durch Oxidation in Schwefelsäure übergehen ("Saurer Regen")
$$2 \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{SO}_4$$
- 3) Verteilung von Schwefelverbindungen verschiedener Oxidationsstufen im Porenraum des Baustoffs durch Bakterien der Gruppe *Sporovibrio*; durch den Stoffwechsel entstehende Sulfidlösungen können durch Bakterien der Gruppe *Thiobacillus* reoxydiert werden.

Durch die Schwefelsäure werden schwerlösliche Salze in leichter lösliche umgewandelt, verbunden mit Volumenkontraktion (siehe auch Kristallisationsschäden) und Abtragen leichtlöslicher Bestandteile, was ein Herauslösen von Zuschlägen sowie die Zermürbung des gesamten Gefüges bewirken kann.

3.6 Schadensbilder und Schadensursachen

Salzschäden treten nicht durch das bloße Vorhandensein in Baumaterialien auf, sondern durch ihre Mobilität in Gegenwart von Feuchtigkeit und die damit verbundenen häufigen Wechsel der Aggregatzustände und Phasen, d.h. ständiger Wechsel von Kristallisation und Auflösung sowie Wasseranlagerung (Hydratation) und Wasserabgabe.

In Prozessen der Kristallisation und/oder Hydratation entfalten die Salze ihre mechanischen Kräfte. Auch wenn die dabei auftretenden Drücke unterhalb der Zugfestigkeit der Baustoffe liegen, können die häufigen Wechsel das Baustoffgefüge zerstören. Im Zustand der Lösung zeigen die Salze ihre Beweglichkeit. Ohne das lösungsbildende und Transportmedium Wasser sind die kristallisierten Salze harmlos. Wichtigste Schadensform bei Vorhandensein von Salzen ist die Zermürbung des Baustoffs, die meist von der Oberfläche oder oberflächennahen Schichten aus beginnt.

3.6.1 Auslaugungen, Aussinterungen und Kalkfahnen

Probleme mit Auslaugungen und Aussinterungen ergeben sich z.B. bei der Ausführung von Tunnelauskleidungen mit Spritzbeton. Dadurch können Dränagen zugesetzt werden und ökologische Probleme im Zusammenhang mit dem hohen pH-Wert des abfließenden Wassers entstehen.

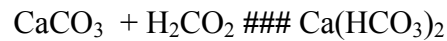
Dabei werden nur die wasserlöslichen Bestandteile des erhärteten Zementsteins ausgelaugt, wobei die leichter löslichen wie z.B. NaOH und KOH mit einer Löslichkeit von 500 g/l stärker betroffen sind als die schwerer löslichen wie z.B. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit einer Löslichkeit von 1,7 g/l. Entscheidend ist jedoch die in einer bestimmten Zeit vorbei- oder durchströmende Wassermenge, so daß auch durch den schwerer löslichen Portlandit aus dem Mörtel oder Beton starke Schädigungen hervorgerufen werden können. NaOH und KOH können u.a. durch Mörtel- bzw. Betonzusatzmittel, z.B. Beschleuniger, in den Spritzbeton gelangen.

Anteil $\text{Ca}(\text{OH})_2$: ca. 80 kg pro m^3 Beton

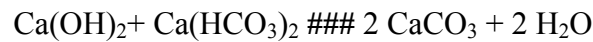
Anteil KOH: ca. 3 kg pro m^3 Beton

Zur Reduzierung bzw. Vermeidung solcher Auslaugungen und Aussinterungen muß die Menge an auslaugbaren Alkalien reduziert werden, z.B. durch den Einsatz von alkaliarmen Zementen und/oder SFA als Betonzusatzstoff sowie die Verwendung von alkalifreien bzw. -armen Zusatzmitteln.

Eine weitere Gefahrenquelle bezüglich der Auslaugung von kalkhaltigen Baustoffen stellt die kalklösende Kohlensäure im Bergwasser dar. Durch sie kann schwerlösliches CaCO_3 aus dem Zementstein und ggf. dem Zuschlag in folgender Weise angegriffen werden:



wobei Calciumhydrogencarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, Löslichkeit ca. 1,1 g/l) entsteht, welches wiederum zu CaCO_3 reagieren kann. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ existiert dabei nicht als festes Mineral, sondern stets in Wasser gelöst.



Die sogenannten Kalkfahnen entstehen z.B. durch Austritt von gelöstem Portlandit aus den Mörtelfugen nach Zementinjektionen (insbesondere bei hohen W/Z-Werten), wobei der Portlandit bei Zutritt des Kohlendioxids der Luft zu Calciumcarbonat reagiert. Ursachen dafür sind meist Vermauerungsfehler und ständiger Zutritt von fließendem Wasser. Auch hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von Baustoffen ist es wichtig, den Gehalt an wasserlöslichen und damit eluierbaren Salzen zu bestimmen.

Ein genormtes Prüfverfahren zur Bestimmung der Salze mit Grenzwertangabe existiert in Deutschland nur für Ziegel (DIN 105 Teil 1). Für Mörtel, Natursteine und Beton gibt es empfohlene Prüfverfahren, die sich in den einzelnen Baustoffinstituten und -prüflabors mehr oder weniger durchgesetzt haben.

Verfahren für Mörtel nach KNÖFEL und SCHUBERT [23]:

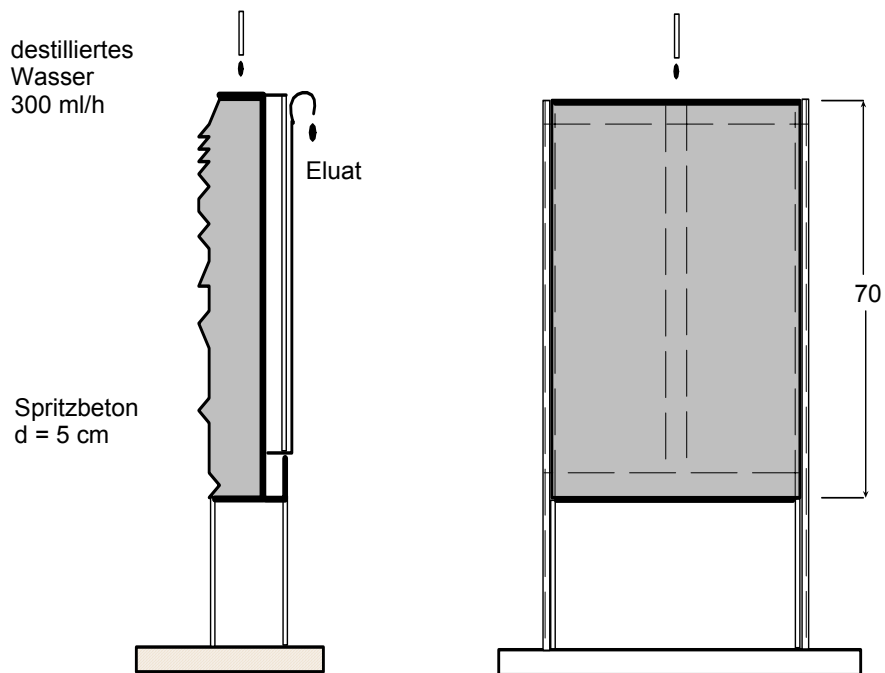
Aufgemahlener, trockener Mörtel wird mit destilliertem Wasser im Verhältnis 1:50 versetzt, eine Stunde in einer Plastikflasche mit einer Schüttelmaschine geschüttelt und anschließend filtriert. Im Filtrat werden die entsprechenden Gehalte an Sulfat, Chlorid, Nitrat u.U. auch an Hydroxid, K^+ , Na^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} bestimmt. Die ermittelten Gehalte werden auf die Einwaage des getrockneten Feststoffs bezogen und in % angegeben.

Verfahren für Beton:

System Holzmann - Auslaugprüfverfahren für Frisch- und Festbeton

In der Prüfvorrichtung fließt am jungen Beton unmittelbar nach dem Spritzen bzw. am älteren Beton kontinuierlich destilliertes Wasser mit einer Geschwindigkeit von 300 ml/h von oben vorbei. Das mit gelösten Stoffen angereicherte Eluat wird abgezogen (Bild 18).

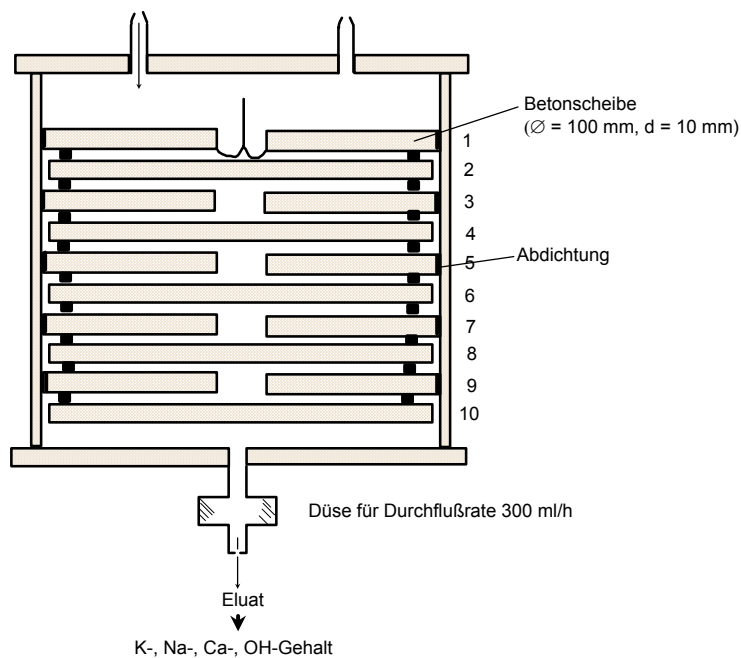
Bild 18: Schema der Prüfeinrichtung (System Holzmann)



Durchströmungszelle nach TU München - Auslaugprüfverfahren für Festbeton

Hierbei werden 1 cm dicke, 28 Tage hydratisierte Betonscheiben geprüft. Destilliertes Wasser fließt mit einer Geschwindigkeit von 300 ml/h mäanderförmig an den Betonscheiben vorbei (Bild 19).

Bild 19: Schema der Prüfeinrichtung (System TU München)



3.6.2 Reaktionssäume und Rißbildung

Reaktionssäume treten auf, wenn kontaktierende Baustoffe miteinander reagieren, z.B. zementhaltiger Injektionsmörtel aus einer Saniermaßnahme mit historischem Gipsmörtel wie z.B. an der Johanniskirche in Ellrich.

Durch den Kontakt der unverträglichen Baustoffe kann es zur Ausbildung von Reaktionssäumen (auch Reaktionszonen genannt) aus Ettringit und Thaumasit kommen. Das führt zur Beeinträchtigung des Haftverbundes bis hin zur Rißbildung, da das Volumen der Phasenneubildungen in der Reaktionszone größer ist als das Volumen der reagierenden Baustoffe. Rißbildung tritt immer dann auf, wenn die Spannungen (hier verursacht durch Volumenvergrößerung) größer sind als die Zugfestigkeit des jeweiligen Baustoffs.

3.6.3 Krustenbildung

Krustenbildung tritt beispielsweise an der wetterabgewandten Oberfläche kalkhaltiger, reaktiver Natursteine, Ziegel und Mörtel durch Reaktionen des CaCO_3 mit dem SO_2 der Luft in Gegenwart von Feuchtigkeit auf. Reaktionsprodukt dabei ist Gips (Calciumsulfatdihydrat), der sich in Form von Krusten auf der Oberfläche oder in den oberflächennahen Schichten ablagert.

Wird die Gipskruste häufig durchfeuchtet, entsteht eine verdichtete Oberfläche ("Sinterschicht"), wodurch die Verdunstungsfront der Mauerwerksfeuchte in den Stein oder Mörtel hinein verlegt werden kann.

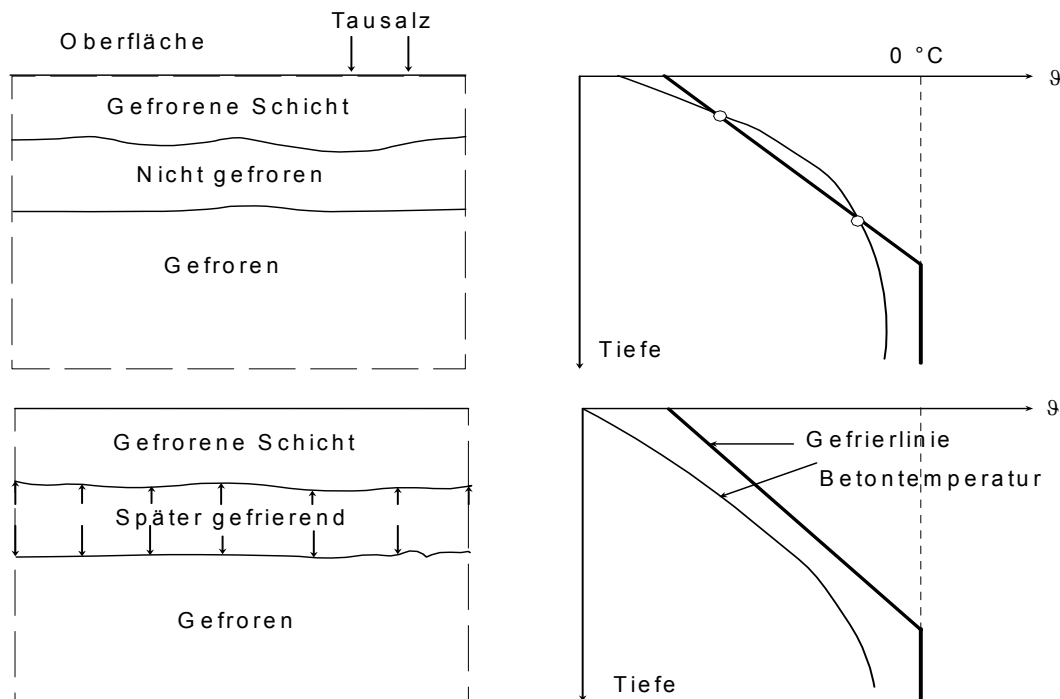
Hydratations- und Kristallisationsdrücke können die Kruste oder ganze Schalen aus Kruste und anhaftendem Gestein absprengen, was zu einer Zerstörung des Steines von der Oberfläche bzw. dem oberflächennahen Bereich aus führt.

3.6.4 Abspregungen und Abplatzungen (Frost - Tausalz - Angriff)

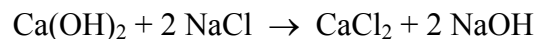
Abspregungen und Abplatzungen sind typische Schadensformen bei der Frosteinwirkung auf mineralische Baustoffe in Gegenwart von Tausalzen. Salze erniedrigen den Gefrierpunkt, wodurch es zu einem schichtenweisen Gefrieren infolge der Tausalzeinwirkung kommt.

Beim Auftauen des Eises mit Tausalzen erfolgt ein Temperaturschock. Die zum Auftauen erforderliche Wärme wird dem Baustoff, z.B. dem Beton, entzogen, wobei die Betonoberfläche rasch abkühlt (Bild 20). Durch den dabei auftretenden Temperaturgradienten können Risse entstehen als Folge innerer Zug- und Druckspannungen. Die durch Rißbildung geschwächte Baustoffschicht wird bei wiederholten Frost-Tau-Wechseln leicht abgesprengt.

Bild 20: Schichtenweises Gefrieren infolge Tausalzeinwirkung auf Betonoberflächen



Als Auftausalze im Verkehrswesen kommen fast ausschließlich Chloride zum Einsatz in der Form von NaCl , CaCl_2 und MgCl_2 . Allgemein wird davon ausgegangen, daß es nur in Gegenwart von CaCl_2 und MgCl_2 zu einer chemischen Wechselwirkung mit dem Zementstein kommen kann, während das NaCl die Schädigung nur physikalisch beeinflusst. Untersuchungen ergaben jedoch, daß in Anwesenheit von Calciumhydroxid auch NaCl -Lösungen den Zementstein chemisch angreifen können, da sich aus dem NaCl nach folgender Gleichung CaCl_2 bildet:



Die Auslaugung des Calciumhydroxids kann zu einer Abnahme der Gelporosität und einer Zunahme der Kapillarporosität führen. Auch die C-S-H-Phasen des Zementsteins können mit den chloridischen Tausalzen in Wechselwirkung treten, wobei die Bindung des Chlorids durch chemische Sorption, Einbau in Zwischenschichten und Einbau in die C-S-H-Phasen erfolgen kann.

Den größten Raum nehmen in der Literatur die infolge Chlorideinwirkung stattfindenden Umwandlungen von AFm (gebildet aus dem C_3A bzw. C-A-H-Phasen des Zementsteins oder hydraulischer Kalke in Gegenwart von Sulfat) in andere Phasen ein. Die sich dabei bildenden Phasen sind von der Konzentration der Chloridlösung, vom Verhältnis Sulfat zu Chlorid und der Umgebungstemperatur abhängig. Bei Untersuchungen zum Einfluß der Lösungskonzentration und der Temperatur auf die Phasenneubildungen wurde festgestellt, daß es in verdünnten Chloridlösungen zur Umwandlung des Monosulfats in Ettringit, Friedelsches Salz, einem Mischkristall zwischen Monosulfat und Monochlorid und der Bildung eines Komplexsalzes

(Calciumoxichlorid) kommen kann. Dabei ist bei tieferen Temperaturen ein deutlicher Anstieg der Ettringitmenge gegenüber den chloridhaltigen Phasen zu beobachten. Bei konzentrierten Chloridlösungen wird temperaturunabhängig nur Friedelsches Salz als Phasenreubildung gefunden. Die o.g. chloridhaltigen Phasenreubildungen können nur bei niedrigen und mittleren Sulfatgehalten auftreten. Bei hohen Sulfatgehalten bilden sich keine chloridhaltigen Phasen aus.

Bei Frost-Tausalz-Untersuchungen an der BU Weimar [25] mit synthetisch hergestelltem Ettringit und Monosulfat in Gegenwart 3%iger NaCl-Lösung wurde festgestellt, daß sich das gesamte Monosulfat in Friedelsches Salz und Ettringit umwandelt. Die Beschleunigung der Monosulfatumwandlung bei Frost-Tausalz-Belastung ist - analog zur reinen Frostbelastung - auf thermodynamische Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen.

Durch die partielle Umwandlung von Monosulfat in Monochlorid wird wiederum Sulfat zur Bildung von Ettringit freigesetzt. Da diese mögliche Phasenumwandlung von Monosulfat (AFm) zu Ettringit (AFt) mit einer starken Volumenzunahme (2,4faches) verbunden ist, muß mit einer Gefügebeeinträchtigung beim Frost-Tausalz-Angriff auf Mörtel und Beton gerechnet werden.

3.6.5 Spezialformen von Salzsäden

Neben den bereits beschriebenen Schadensbildern können die folgenden Schäden ebenfalls Reaktionen mit Salzen zugeschrieben werden, wobei auf die Reaktionsabläufe hier nicht eingegangen werden soll:

- Alkalitreiben durch Kontakt von reaktiver Kieselsäure - z.B. aus dem Zuschlag - mit Alkalien
- Sulfatreiben durch Unverträglichkeit von Baustoffen z.B. durch zu hohen SO_3 - Gehalt im Zement, sulfathaltigen Zuschlag, Einfluß von sulfathaltigen Wässern, Böden oder Gasen oder Vorhandensein von Gips als Naturstein oder Zuschlag insbesondere bei historischen Bauwerken (siehe auch Reaktionssäume)
- Stahlkorrosion durch Chlorideinwirkung

3.7 Maßnahmen zur Sanierung von Gebäuden mit Salzsäden

Bei Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden mit Salzbelastung sollte ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß es nicht möglich ist, die Salze vollständig aus dem Bauwerk zu entfernen bzw. sie dauerhaft zu inaktivieren. Die folgenden Maßnahmen sollen jedoch verdeutlichen, daß es im Rahmen einer sinnvollen Sanierung Möglichkeiten gibt, das Schädigungspotential zu minimieren. In Verbindung mit Konservierungsmaßnahmen wie Festigung oder Hydrophobierung ist die Reduzierung des Salzgehaltes eine unabdingbare Voraussetzung.

Unterbrechung des Schädigungszyklus

Da sich die Wirkung der Salze erst in Gegenwart von Feuchtigkeit entfaltet, kann durch weitgehende Entfernung der Feuchtigkeit aus dem Bauwerk und die Verhinderung des Zutritts neuer Feuchtigkeit die Schädigung der Salze unterdrückt werden. Wirksame Methoden zur Reduzierung des Feuchtetransportes im Bauwerk sind das Einbringen einer Horizontalsperre sowie einer Vertikalabdichtung im Spritzwasserbereich. Dadurch wird die zyklische Kristallisation und Auflösung sowie Wasseranlagerung und Wasserabgabe der Salze im Bauwerk unterdrückt. Bereits auf der Oberfläche kristallisierte Salze können mechanisch beseitigt werden.

Dabei sollte jedoch der „Sanierungsspielraum“ des jeweiligen Objektes berücksichtigt werden, d.h. das Nutzungskonzept nach der Sanierung muß sich in Abhängigkeit von der Art und Menge der nachgewiesenen Salze nach den bauphysikalischen Gesetzmäßigkeiten richten. So ist bei historischen Bauwerken mit i.d.R. hohen Mauerwerks- und Raumfeuchten nicht in jedem Fall eine museale oder gastronomische Nutzung möglich [66].

Einsatz von Sanierputzen

Sanierputze werden gemäß Definition im WTA-Merkblatt 2-2-91 [A22] aus Werk trockenmörteln nach DIN 18557 [A6] hergestellt. Es sind Putze mit hoher Porosität und Wasserdampfdurchlässigkeit bei erheblich verminderter kapillarer Leitfähigkeit. Die Funktionsweise des Sanierputzes wird von KOLLMANN [24] in folgender Weise beschrieben:

Die salzhaltige Lösung aus dem Mauerwerk wird vom Sanierputz kapillar angesaugt. Aufgrund der starken Hydrophobierung und der kapillarbrechenden Poren gelangt die Lösung nur maximal 5 mm in den Sanierputz. Das Wasser verdunstet und gelangt als Wasserdampf an die Oberfläche. Dadurch bleibt die Putzoberfläche trocken und frei von Ausblühungen. Die Salze kristallisieren innerhalb des Putzes in den Luftporen, wo sie genügend Platz zum Wachsen haben. Eine Zerstörung durch Salze ist weitgehend ausgeschlossen. Verfolgt man diesen Mechanismus weiter, müßte man annehmen, daß eines Tages der Porenraum im Grenzbereich gefüllt ist. Es können keine weiteren Salze aufgenommen und der Putz würde abgedrückt werden. Dann wäre der Zeitpunkt gekommen, den Sanierputz zu erneuern. Das ist jedoch in der über 20 jährigen Sanierungspraxis nur in Extremfällen beobachtet worden.

Die WTA¹ stellt ihre Anforderungen an Sanierputzsysteme, d.h. der Putz ist aus mehreren Schichten aufgebaut. Die erste Schicht besteht aus einem netzförmig aufgetragenen Spritzbewurf, der den Haftverbund zum Putzgrund sichern soll. Danach wird als Ausgleichsschicht ein Grundputz aufgebracht. Bewährt hat sich dafür ein sogenannter Porengrundputz. Der Porengrundputz ist weniger hydrophob eingestellt als der Sanierputz, der auf den Grundputz aufgetragen wird. Zusätzliche Anstrichsysteme oder mineralische Dekorputze müssen diffusionsoffen und bei regenbelasteten Flächen wasserabweisend ausgerüstet sein, um die Funktionsfähigkeit des Sanierputzsystemes zu gewährleisten. Das mehrlagige Aufbringen des Sanierputzes erfordert ein

¹ Wissenschaftlich - Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.

sorgfältiges Aufrauhern der einzelnen Lagen, um einen ausreichenden Haftverbund zu sichern.

Sanierschlämmen finden Anwendung bei Sichtmauerwerk z.B. historischem Quadermauerwerk aus Naturstein, bei geringem Versalzungsgrad oder wenn aus konstruktiven Gründen eine geringe Schichtdicke erwünscht ist. Ihre Dauerhaftigkeit ist jedoch geringer als die von Sanierputzsystemen.

Einsatz chemischer Salzbehandlungsprodukte allgemein

Zur Reduzierung des Salzgehaltes im Bauwerk ist es möglich, handelsübliche Salzbehandlungsprodukte einzusetzen. Ihre Wirkung beruht auf der Umwandlung leicht wasserlöslicher Salzkomponenten in schwerlösliche Verbindungen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß es nicht zu Wechselwirkungen mit Eigensalzen des Baustoffs kommen darf, die dessen Bestand gefährden würden. Darüber hinaus ist diese Methode bei der häufig vorkommenden Gruppe von bauschädlichen Nitraten nicht anwendbar, da es keine schwerlöslichen Nitrate gibt.

Einsatz von Kompressen

Zur Reduzierung des Salzgehaltes insbesondere im oberflächennahen Bereich ist es auch möglich, Kompressen einzusetzen. Die Kompressenmethode wird vor allen Dingen als vorbereitende Maßnahme vor Sanierputz- oder Schutzmittelapplikationen angewendet.

Der Erfolg der Kompressenentsalzung hängt neben den Materialkennwerten des zu behandelnden Baustoffs (z.B. Sandstein, Ziegel) auch von der Art des Salzes ab.

In der Regel sind zwei Kompressen erforderlich: Die erste Komresse (hauptsächlich aus Zellulose bestehend) dient der Befeuchtung für den Fall, daß der Ansaugkoeffizient des Mauersteins (z.B. bei Ziegeln) größer ist als der der Komresse und die Salze ansonsten nicht in die gewünschte Richtung wandern würden. Durch die zweite Komresse (ein Gemisch aus Bentonit, Zellulose und Sand) wird die Verdunstungszone nach außen verlagert, wodurch die Salze außerhalb des Gesteins kristallisieren und der Salzgehalt im Stein bzw. in der Steinoberfläche reduziert wird.

Je nach Qualität und Quantität der Fremdsalzbelastung kann es erforderlich sein, die Kompressenbehandlung zu wiederholen. So wurde z.B. bei Untersuchungen zur Kompressenentsalzung von Wüstenzeller Sandstein festgestellt, daß bei Vorhandensein von $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ eine Dreifachbehandlung sinnvoll ist, während bei KNO_3 eine Einfachbehandlung ausreicht.

Elektrochemische Entsalzung

Die elektrochemische Entsalzung beruht auf dem Prinzip der Beschleunigung von Ladungsträgern im elektrischen Feld. Verbindet man das salzhaltige Mauerwerk mit Elektroden bzw. fügt man diese ins Mauerwerk ein und legt daran eine Gleichspannung an, so werden die Anionen zur Anode und Kationen zur Katode beschleunigt. An den Elektroden werden die Ionen in entsprechender Reihenfolge ihrer Standardpotentiale entladen. Die Wirkmechanismen und Transportphänomene elektrochemischer

Verfahren sind sehr komplex. Aussagen zu Einsatzbereichen und Grenzen der einzelnen Verfahren sind nicht bekannt, ebenso verantwortliche Transportprozesse ungeklärt. Eine Abschätzung der Leistung im Vorfeld der Anwendung ist mit dem bisherigen Kenntnisstand schwierig. Eine umfassende Untersuchung zu den Einflußgrößen bei der elektrochemischen Entsalzung von Mauerwerk erfolgte bisher nicht.

Mögliche Einflußfaktoren sind:

- Porenfüllungsgrad
- Salzgehalt und Salzart
- Menge und Struktur der Porosität des zu entsalzenden Werkstoffes
- Art des zu entsalzenden Materials hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung
- Elektrodenart
- Art des Verbundes Elektrode - Mauerwerksbaustoff hinsichtlich des verwendeten Materials und der Ausbildung des Verbundes
- Art des Fugenmaterials und dessen Anteil am Mauerwerkskörper
- Größe des elektrischen Feldes

Beispiele für elektrochemische Entsalzungsverfahren sind das AET -, ELCOPOL - und KERASAN - Verfahren.

Chemische und mechanische Reinigung

Bei den Reinigungsverfahren wird unterschieden in mechanische Verfahren, chemische Verfahren und Kombinationen aus beiden, wobei die letztgenannte Variante in der Baupraxis überwiegt. Am einfachsten sind Ausblühungen zu entfernen. Sie lassen sich in den meisten Fällen trocken abbürsten oder „verschwinden“ häufig unter Witterungseinwirkung von allein.

Zu den chemischen Verfahren gehören z.B. das wiederholte Abwaschen mit klarem Wasser und ggf. Enthärter oder Detergentien. Bei Kalkfahnen wird z.B. Essigsäure verwendet. Das Problem dabei ist jedoch, daß sich ausblühfähige Calciumacetate bilden können.

Bei Einsatz chemischer Verfahren sollte jedoch folgendes berücksichtigt werden:

- immer gut mit Wasser nachspülen, damit nicht erneut Fremdionen ins Bauwerk gelangen
- Gebrauchsanweisung des Herstellers genau beachten
- Art der ausblühenden Salze bei der Behandlung berücksichtigen

Zu den mechanischen Verfahren gehören Trockenverfahren, z.B. Strahlen mit unterschiedlichen Strahlmitteln wie Quarzsand, Basalt, Glaskugeln, Holzpartikeln oder Walnußschalen und Reinigen mit wassergekühltem Ultraschallmeißel, sowie Naßverfahren wie z.B. das Dampfstrahlen.

Bei den mechanischen Reinigungsmethoden ist es besonders wichtig, die physikalischen Eigenschaften des Werksteins (Naturstein, Ziegel, Beton) wie Festigkeit, Dichtigkeit usw. zu berücksichtigen, da die Steinoberfläche sonst irreparabel geschädigt werden kann. Bei Ziegeln ist besonders darauf zu achten, daß die Brennhaut nicht verletzt wird.

Wichtig für die Sanierung ist in jedem Fall, die Erfassung der Art des Schadsalzes oder des Salzgemisches (mineralogische Zusammensetzung) sowie dessen Quantität und Verteilung im Bauteil. Das ist einerseits notwendig, um das Gefährdungspotential, das von den Salzen für die vorhandene Bausubstanz ausgeht, abzuschätzen und um andererseits die Sanierbaustoffe gezielt auswählen zu können. Für beide Fälle, d.h. zur Prüfung der Originalsubstanz als auch zur Untersuchung der neu einzubringenden Baustoffe, gibt es für bestimmte Baustoffgruppen Möglichkeiten, deren Verhalten in Gegenwart von Salzen im Rahmen von Laborversuchen zu erfassen. Dabei variieren jedoch die Prüfbedingungen und Abnahmekriterien bei verschiedenen Baustoffen z.T. erheblich, so daß eine objektive Bewertung nicht in jedem Fall gegeben ist.

Naturstein:

Der Kristallisationsversuch nach DIN 52111 [A15] dient der Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit von Naturstein. Dabei wird eine innere Beanspruchung durch Druck infolge Volumenzunahme simuliert, weshalb die Prüfung für Gesteine, die durch die Einlagerung in Natriumsulfatlösung eine chemische Veränderung erfahren könnten, nicht geeignet ist.

Der Kristallisationsdruck entsteht dadurch, daß reines Natriumsulfat bei einer Temperatur oberhalb 32,4 °C wasserfrei als Thenardit Na_2SO_4 auskristallisiert und bei niedrigeren Temperaturen unter beträchtlicher Volumenzunahme zu Glaubersalz $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ umkristallisiert.

Die Natursteinprüfkörper werden dementsprechend wechselgelagert, und nach einer bestimmten Anzahl der Wechselbeanspruchung werden die Masseänderung, die Änderung der Biegezugfestigkeit und/oder des E-Moduls sowie die äußere Beschaffenheit (Rißbildung usw.) erfaßt.

Putze:

Eine Untersuchung von Putzen bzw. Sanierputzen auf Salzresistenz ist gemäß WTA-Merkblatt 2-2-91 [A22] möglich. Die Sanierputzscheiben der Abmessung $\varnothing = 10 \text{ cm}$ und Dicke = 2 cm werden in eine definierte Salzlösung aus 35 g NaCl, 5 g Na_2SO_4 und 15 g NaNO_3 in einem Liter deionisiertes Wasser gelegt und mit einem Deckel, der Aussparungen für die Prüfscheiben hat, abgedeckt. Während der Prüfung muß soviel Salzlösung nachgegeben werden, daß die Scheibenunterseite ständig benetzt bleibt. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn der Putz nach einer Prüfdauer von 10 Tagen nicht von Salzlösung durchdrungen ist.

Verträglichkeit unterschiedlicher Mörtelbindemittel mit Salzen nach BU Weimar [57, 58]:

Für die Untersuchung der Verträglichkeit in überschaubaren Prüfzeiträumen ist es einerseits wichtig, einen innigen Kontakt der zu untersuchenden Systeme herzustellen und andererseits die reagierenden Komponenten so wenig als möglich zu "verdünnen". Deshalb werden bei den Versuchen keine zuschlaghaltigen Mörtel verwendet, sondern Bindemittelleime, denen beim Mischen die jeweiligen Reaktionspartner, z.B. Salze, Originalmörtel oder Bindemittel, zugegeben werden. Darüber hinaus werden bei der Lagerung der Prüfkörper solche Bedingungen gewählt, die eine Bildung der wasserreichen Treibminerale begünstigen, d.h. niedrige Temperaturen und hohe Feuchten.

Als Maß für die Verträglichkeit wird die Längenänderung bzw. Dehnung herangezogen, die sich beim Kontakt der zu testenden Systeme (z.B. Bindemittel mit Salz) einstellt sowie deren Verlauf im Untersuchungszeitraum. Die Messung erfolgt an Prismen der Abmessung $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ mit Meßzapfen an den Stirnseiten mit einem Meßgehänge gemäß DIN 52450. Zusätzlich wird die Masseänderung erfaßt. Bei starken Dehnungen werden röntgendiffraktometrische, differenzthermoanalytische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen durchgeführt, in deren Ergebnis die Ursache der Dehnung geklärt werden kann.

Verträglichkeit mineralischer Mörtel mit Gips nach HENKEL/KNÖFEL [18]:

Als Maß für die Verträglichkeit wird hierbei ebenfalls die Längenänderung herangezogen, die sich beim Kontakt der mineralischen Mörtel mit Gips einstellt. Die Messung erfolgt an Prismen der Abmessung $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ mit aufgeklebten Meßmarken mit dem BAM-Setzdehnungsmesser.

Die Prüfmischung setzt sich aus 450 g des zu prüfenden Bindemittels, 67,5 g Calciumsulfatdihydrat z.A. (= 15 % bezogen auf das Bindemittel) und 1350 g Normsand zusammen (Wasserzugabe gemäß eines konstanten Ausbreitmaßes von 17 cm).

4 Entwicklung des Injektionsschaummörtels

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines Injektionsmörtels verbunden mit einem angepaßten Injektionsverfahren, das sich zur Verbesserung der Tragstabilität von Bauteilen oder Bauwerken, zum Verfüllen von Hohlräumen und Rissen und zur Verbesserung des Verbundverhaltens aller Mauerwerkskomponenten eignet. Die zu entwickelnden Injektionsschaummörtel sollen zu einer geringen Feuchte- und Massebelastung im Bauwerk führen und sich in ihren mörteltechnischen und bauphysikalischen Eigenschaften möglichst gut an die Parameter des zu sanierenden Mauerwerkes anpassen lassen. Dabei wurde die Idee von Prof.Dr.Ing.habil. Stark und Herrn Dipl.-Ing. I. Mielke, das überschüssige Wasser durch Luft in der Form von Schaumporen geeigneter Größe zu ersetzen, in die Realität umgesetzt. Prof.Dr.Ing.habil. Stark und Mitarbeiter erhielten dafür den 1992 erstmalig von HEIDELBERG ZEMENT gestifteten Innovationspreis.

Die Entwicklung des Injektionsschaummörtels umfaßte die Optimierung der Mörtelrezepturen, die Auswahl geeigneter Gerätekonfigurationen und die Erprobung eines unter verschiedenen baupraktischen Bedingungen realisierbaren technologischen Ablaufs.

Die Beeinflussung der Frisch- und Festmörteleigenschaften erfolgt zum einen durch die Wahl des Bindemittels und zum anderen über die Art des Schaumes sowie den Schaumanteil im Mörtel.

4.1 Geschichtlicher Rückblick

„Nach einer Zusammenstellung der in Deutschland erteilten Patente für Leichtbeton bearbeitet von Clara Müller ist im Jahr 1889 das DRP. 55919 für porigen Zement- und Gipsmörtel mit Säuren als Gas- und Schaumbildner, im Jahr 1917 an die Nederlandsche Gist- und Spiritusfabriek in Delft und das DRP. 304854 als Verfahren zur Herstellung poröser Massen mit Hefepilzen oder Stoffen verwandter Wirkung als Treibmittel erteilt worden, im Jahr 1918 das DRP. 324315 für leichte Körper aus Beton, Ton und Zement mit Zuschlagstoffen, die Gase entwickeln und Hohlräume erzeugen oder in die Luft eingepreßt wird und im Jahr 1919 das DRP. 327907 für porige Körper aus Zement mit Zinkstaub als Treibmittel. Vom Jahr 1921 ist das DRP. 381405 der Chemischen Fabrik Griesheim-Elektron hervorzuheben, gültig für Beton aus Emulsionen von Zement, Wasser und in Wasser unlöslichen Flüssigkeiten. Das DRP. 396691 vom Jahr 1923 beschreibt einen Schaumbeton. Vom gleichen Jahr ist das DRP. 404677 bekannt, das die Herstellung von Leichtsteinen aus Portlandzement, Schieferasche, Kalk und einem gasbildenden Metall unter Zugabe eines Erstarrungsbeschleunigers beschreibt. Vom Jahr 1923 ist ferner das DRP 421777 hervorzuheben, das den Schaumbeton mit Hilfe von Pflanzenleim oder Gelatine oder Formaldehyd, Harzseife usf. empfiehlt. Im DRP. 454744 vom Jahr 1925 ist die Herstellung eines Leichtkalkbetons aus fein verteilten, innigen Gemischen von Kalk, Kieselsäureträger und Wasser beschrieben, der wie der

Kalksandstein künstlich gehärtet wird. Auf die Verwendung von Calciumcarbid und anderen Calciumsalzen ist u.a. in den DRP. 467716, 469864, 520506 verwiesen; Aluminiumlegierungen sind im DRP. 505361 genannt.“ [16].

In Deutschland sind zwei Arten von Schaumbeton häufig verwendet worden, der Zellenbeton und der Iporitbeton. Der Zellenbeton ging vom DRP. 421777 und den Zusatzpatenten 453265 und 499405 von BAYER aus sowie vom Betocel (früher auch Isobet und Thermobet genannt), der für Dämmschichten auf Decken, Bausteine und Platten verwendet wurde. Der Betocel nach COHNEN war ein unter Verwendung des Schaumbildners Betocelon hergestellter Schaumzementbeton der Firma Kind GmbH Aschaffenburg.

Der Iporitbeton beruhte auf dem DRP. 574793 und dem Zusatzpatent 588196 von WOLF, LEUCHS, SÄNGER und WELSCH und wurde vornehmlich zu Bausteinen für Wohnhäuser verarbeitet [16]. Der Iporitbeton ließ sich in jedem gebräuchlichen Betonmischer herstellen, sofern dieser ein kräftiges, schaumschlagendes Durchmischen gewährleistete. Dem Anmachwasser wurde das Schaummittel (1 % Iporit bezogen auf das Zementgewicht) zugesetzt. Zur Erhöhung der Schaumbeständigkeit wurde Wasserglas zugegeben (5,4 kg bis 6,7 kg pro 100 kg Zement). „Als Sand kann jede Sorte verwendet werden, die mindestens 70-80 % Feinsand und keine Bestandteile über 5 mm Korngröße enthält. Geringe tonige Beimengungen bis 3 % sind unschädlich und sogar erwünscht. Das Mischverhältnis von Zement : Sand beträgt 1 : 3,5 bis 1 : 4,5 Raumteilen. Die Bestandteile werden in folgender Reihenfolge in den Mischer gegeben: Wasser - Iporit - Sand - Zement - Wasserglas im langsamen Strahl. Wasser soll nur soviel angewandt werden, daß sich gerade noch eine gute Schaumbildung ermöglichen läßt und ein fließender Schaumbetonbrei entsteht. Sobald der sahnige Zementschaum ein Litergewicht von etwa 1,3 kg besitzt, wird der Mischer entleert. Der Brei hat dann sein endgültiges Volumen erreicht und ist beim Verlassen des Mischer sofort verwendungsbereit.“ [29]

Großformatige Iporitsteine (volumenmäßig = 5,5 NF-Ziegel) sind nicht nur zur Ausführung von Füllmauerwerk im Skelettbau, sondern auch für tragendes Mauerwerk verwendet worden. Die Rohdichte der nagel- und zersägbaren Steine lag zwischen 1,2 kg/dm³ und 1,35 kg/dm³ und die Druckfestigkeit zwischen 2 N/mm² und 4 N/mm².

Erstmals in die Deutsche Industrienorm eingegangen sind der Gas- und Schaumbeton 1951 [A1]. Diese Fassung ist bis heute nicht aktualisiert worden.

4.2 Grundlagen und Definition

STEGEMANN [54] beschreibt 1941 den Schaumbeton in folgender Weise: „Schaumbetone sind diejenigen Arten von Leichtbeton, die ihre maßgebenden Eigenschaften davon erhalten, daß der Beton gleichmäßig mit Schaum durchsetzt wird. In den dünnflüssigen Beton wird ein schaubildendes Pulver oder Schaum eingeführt, der vorher aus einem Schaumstoff hergestellt wird. Wesentlich ist, daß die Schaumbläschen ihre aufblähende Wirkung behalten, bis der Beton abgebunden hat.

Schaumbeton wird nach [40] durch Mischen von Sand, Zement, Anmachwasser und vorgefertigtem Schaum hergestellt. Dabei ist die Bezeichnung Beton eigentlich irreführend, da der Zuschlag mit einem Größtkorn bis max. 2 mm verwendet wird, so daß man die Bezeichnung Schaummörtel führen müßte.

Typische Einsatzmöglichkeiten für Schaumbeton sind:

- Verfüllung von alten Kanalisationen, Gräben und Stollen
- Verfüllung von Baugruben um Gebäude und Schwimmbecken
- Dämmschichten auf und unter Gebäuden
- Tragschichten für Verkehrs- und Sportflächen auf schlecht tragfähigen Böden
- Verfüllen von Hohldecken und Gewölbeoberseiten bei Um- und Ausbauten
- verlorene Schalungen
- Bauteile für den Wohnungsbau
- Außen- und Innenwände für Wohnbauten aller Art, insbesondere in Entwicklungs- und OPEC-Ländern und in erdbebengefährdeten Gebieten
- Verfüllen von großen Aussparungen im Hochbau [40]

Nach Pier [39] wird Schaummörtel als ein von Gasblasen durchsetzter Baustoff beschrieben.

Folgende spezielle Einsatzgebiete des Schaummörtels werden von [39] beschrieben:

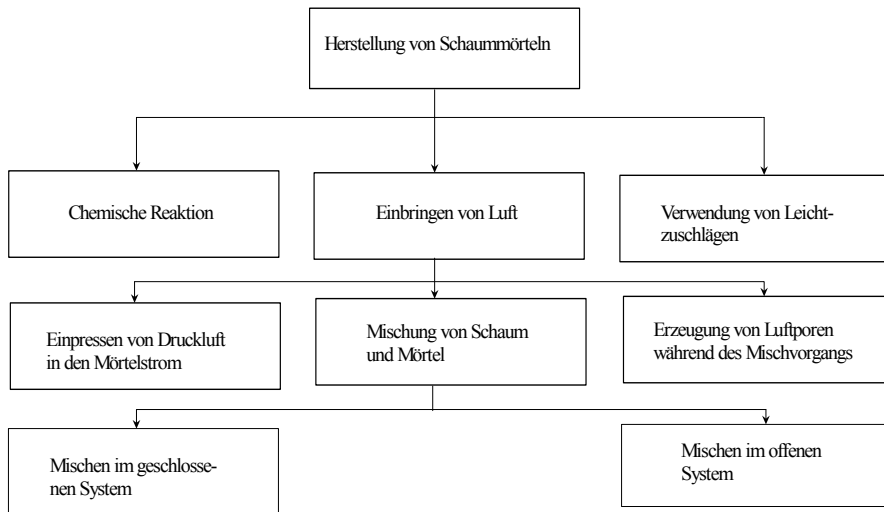
- Hinterfüllung beim Betonpaneelausbau im Gebirge
- Hinterfüllung und Abdichtung von Abbaustrecken unter Tage
- Hinterfüllung beim Schachtausbau unter Tage z.B. zwischen Kohleflöz und Schachtring

Während Normalbeton ein Gemisch aus Zementsteinmatrix und Zuschlägen mit geringem Porenanteil ist, wird beim Schaumbeton der Zuschlaganteil vollkommen oder in größeren Anteilen durch Luftporen ersetzt. Dadurch unterliegen die Festmörtel- bzw. Festbetoneigenschaften anderen Gesetzmäßigkeiten als beim Normalbeton.

Der Schaumbeton entsteht durch Untermischen von Luft in Form eines Luftporenschaumes oder durch Luftporenbildung während des Mischens von Bindemittel, Zuschlägen und Wasser. Voraussetzung für die Bildung und Stabilität der Luftporen sind grenzflächenaktive Stoffe (Tenside), wobei mit Schaumbildnern gröbere Poren erzeugt werden können als mit Luftporenbildnern [21].

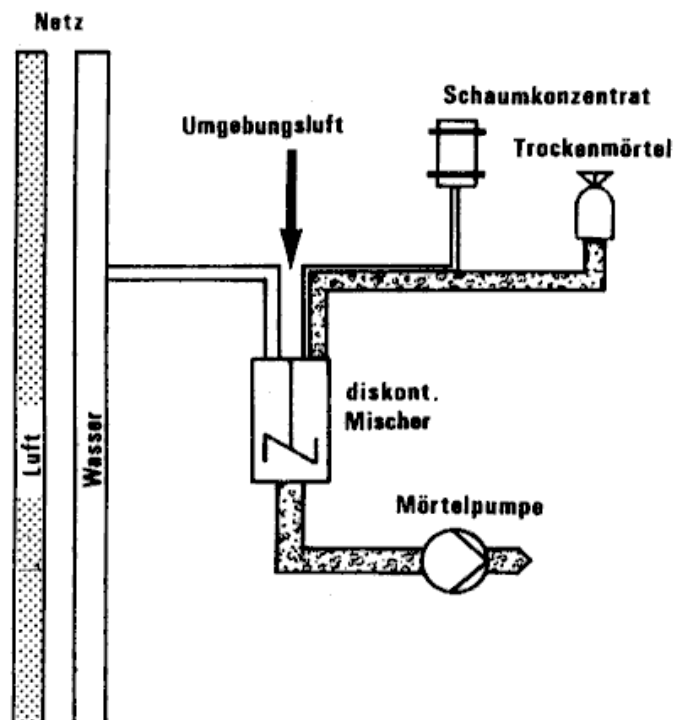
Gasbeton (Porenbeton) ist eine spezielle Form von Schaumbeton, bei dem die Poren erst bei der Betonherstellung durch chemische Reaktionen des enthaltenen Treibmittels mit dem Bindemittel entstehen.

Für die Herstellung von Schaummörtel bestehen folgende verfahrenstechnische Möglichkeiten:

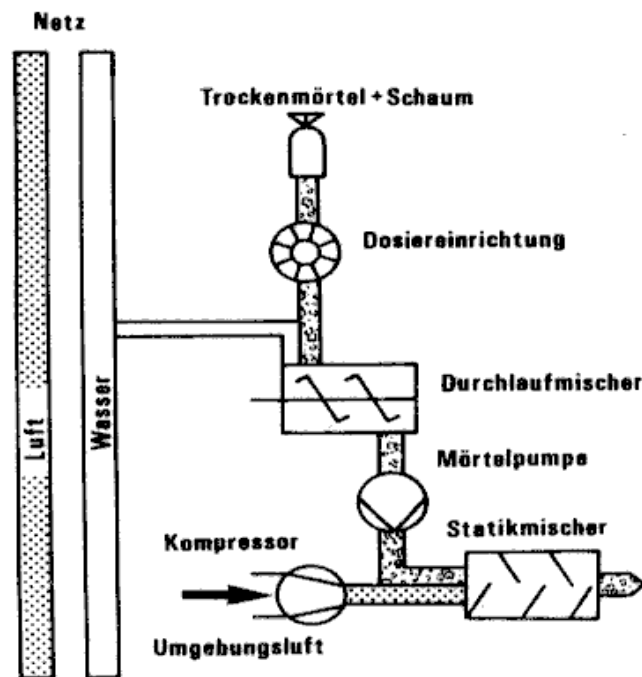


woraus sich die folgenden kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren ableiten [39]:

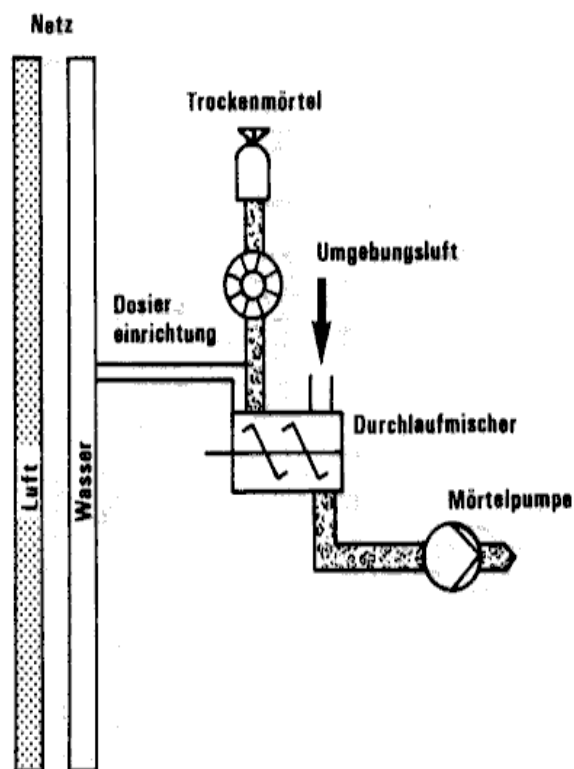
a) Erzeugung von Luftporen während des Mischvorganges



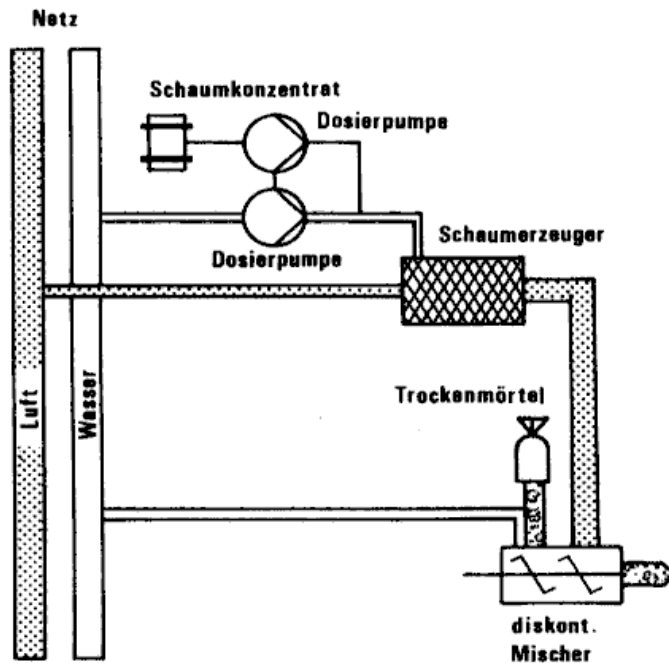
b) Einpressen von Luft in den Mörtelstrom



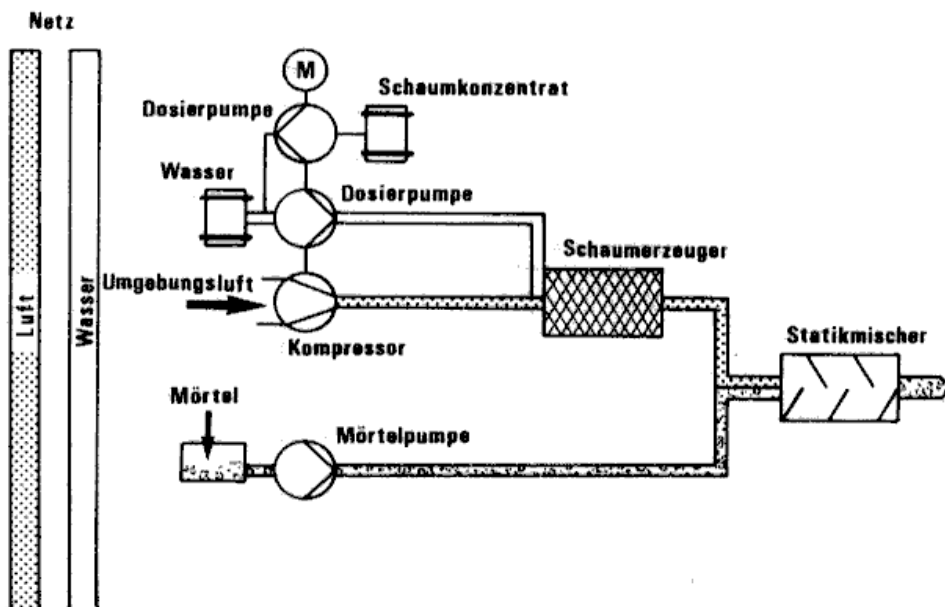
c) Aqualight-Verfahren



- d) Mischen eines fließfähigen Mörtels mit einem vorgefertigten Luftporenschaum, diskontinuierlich im offenen System



- e) Mischen eines fließfähigen Mörtels mit einem vorgefertigten Luftporenschaum, kontinuierlich im geschlossenen System



Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Injektionsmörtel entwickelt, der aus einem Bindemittelleim durch Untermischen eines Luftporenschaumes hergestellt wird. Dieser Injektionsschaummörtel ist ein mineralischer Mörtel mit max. 0,8 % organischen Anteilen aus den Zusatzmitteln Schaumbildner und Stabilisierer. Dabei handelt es sich wie bei den meisten Injektionsmörteln nicht um einen Mörtel im eigentlichen Sinne, da er ohne Zuschläge verarbeitet wird. Durch den Schaumzusatz werden Luftporen in den frischen Bindemittelleim eingebracht, die dort gewissermaßen den Raum der Zuschläge einnehmen. Nach dem Erstarren und Erhärten des Bindemittels bleiben analog zum Schaumbeton [49] gemäß DIN 4164 [A1] mit Luft gefüllte Hohlräume zurück, die von der festigkeitsbildenden Bindemittelmatrix (ohne Zuschlag) umgeben werden.

4.3 Herstellung des Injektionsschaummörtels

4.3.1 Einsatzstoffe

Zur Herstellung des Injektionsschaummörtels werden ein hydraulisches Bindemittel und Wasser sowie die organischen Zusatzmittel Schaumbildner und Stabilisierer benötigt. Die umfassende Charakterisierung der verwendeten Bindemittel folgt unter Punkt 4.4.

4.3.1.1 Schaumbildungsmechanismus und Schaumbildner

Schaum ist ein disperses System aus Gas und Flüssigkeit bzw. Gas und Feststoff, in dem der Volumenanteil der Gasphase überwiegt.

Nach DIN 53902 [A2] ist Schaum die Gesamtheit der durch dünne Flüssigkeitslamellen getrennten gasförmigen Zellen, gebildet durch Zusammenlagerung der Blasen, die ein in einer Flüssigkeit dispergiertes Gas (Luft) erzeugt.

Als Schaumbildner können Tenside und Proteinhydrolysate verwendet werden. Tenside sind grenzflächenaktive Stoffe, die aus einem hydrophoben organischen Rest und einer hydrophilen Gruppe bestehen. Die Grenzflächenspannung muß gegenüber der Luft herabgesetzt werden, damit die Luft unter die sogenannte Flottenoberfläche gelangen kann. Sobald die Flotte mit der Luft in Berührung kommt, bilden sich an den Grenzflächen der Luft im Innern der Flotte Adsorptionsschichten, deren hydrophobe Reste der Luft und deren hydrophile Gruppen der Wasserphase zugekehrt sind [40]. Durch den Schaumbildner wird die Oberflächenspannung des eingebrachten Wassers herabgesetzt, und der Schaum entsteht durch die mit Druck eingeblasene Luft.

Als Maß für das Schäumvermögen im Sinne der DIN 53902 gilt das Volumen des unter den Bedingungen dieser Norm erzeugten Schaumes. Das Schaumvolumen hängt u.a. ab vom Flüssigkeitsvolumen und den mechanischen Bewegungen, unter denen die Luft hineingearbeitet wird [A2].

Hauptbestandteil der Schaumblase ist die Schaumlamelle, die beiderseits von einem Oberflächenfilm oder einem Oberflächenhäutchen bedeckt ist. Das

Oberflächenhäutchen enthält zwischen den solvationsfähigen Gruppen Flüssigkeit. Eine frisch gebildete Schaumlamelle beginnt gleich nach ihrer Entstehung dünner zu werden. Hervorgerufen durch Gravitationskräfte und den kapillaren Sog fließt Flüssigkeit aus der Lamelle ab, was auch als Schaumdrainage bezeichnet wird. Ihre Geschwindigkeit ist für die Stabilität und die Lebensdauer der Schäume von Bedeutung, da die Wahrscheinlichkeit des Lamellenbruchs mit abnehmender Lamellendicke steigt [38]. Die Größenordnung der Lamellendicke liegt im nm-Bereich.

Man unterscheidet zwei Arten von Schaum: den Kugel- und den Polyederschaum.

Der Kugelschaum ist eine konzentrierte Verteilung selbständiger Blasen in einem flüssigen, gasförmigen oder erstarrten Verteilungsmittel. Der Kugelschaum kann aus Einzelblasen in Film- und Lamellenform bestehen und durch äußere Kräfte auch eine nichtkugelige oder polyederähnliche Form annehmen, die auch als Wabenschaum bezeichnet wird.

Der Polyederschaum ist ein Verband polyedrisch geformter Blasen, die ihre Selbständigkeit verloren haben. Der Blasenverband des Polyederschaumes kann sich nur aus Film- und Lamellenblasen bilden und nicht aus Einzelblasen.

Eine charakteristische Größe von Gas/Flüssigkeits-Systemen ist der Gasanteil φ :

$$\varphi = \frac{V_G}{V_{FL} + V_G}$$

V_G	...	Gasvolumen
V_{fl}	...	Flüssigkeitsvolumen

Kugelschaum besitzt einen Gasanteil zwischen $\varphi = 0,52$ und $0,74$, während bei Polyederschäumen der Gasanteil $\varphi > 0,74$ ist [38].

Die chemische Zusammensetzung sowie die Konzentration des Schaumbildners und das Gerät zur Schaumerzeugung beeinflussen die Stabilität des Schaumes sowie die Schaumdichte und somit auch die Frischmörteleigenschaften und die Stabilität des Injektionsschaummörtels. Die Schaumbeständigkeit ist eine Funktion der Konzentration des Tensids in der Lösung, der Temperatur dieser Lösung und oft auch der Härte des Wassers für die Lösung [A2]. Bei Untersuchungen zum Einfluß der Wasserhärte des Mörtelanmachwassers auf die Luftporenbildung bei Sanierputzen wurde jedoch festgestellt, daß zwischen Wasserhärten von 1 mmol/l und 14 mmol/l kein signifikanter Einfluß ausgeübt wird [24]. Die Schaumbeständigkeit kann auch durch die Dauer der Schaumerzeugung beeinflusst werden [A2].

Nach [47] tragen 3 Prozesse zur Instabilität und Zerstörung von Schäumen bei:

- 1 das Abfließen der interlamellaren Flüssigkeit
- 2 das Brechen der Flüssigkeitslamellen und
- 3 die Gasdiffusion.

Die Gasdiffusion innerhalb eines Schaumes ist dann von Bedeutung, wenn Schaumblasen unterschiedlicher Größe vorhanden sind. Aufgrund des Überdruckes in den kleinen Gasblasen, der um so größer ist, je kleiner der Durchmesser der Gasblase ist, diffundiert das Gas aus den kleinen Blasen durch die Lamellen in die großen Blasen, bis die kleinen Blasen ganz verschwinden [40].

Für die Versuche zum Einfluß des Schaumbildners wurden der Schaumbilder 2 (SB 2) und der Schaumbildner 31 (SB 31) der Firma ADDIMENT sowie der Schaumbildner 285 (SB 285) von WOERMANN verwendet. Tabelle 9 beschreibt die Inhaltstoffe und technischen Daten der Schaumbildner. In allen drei Fällen handelt es sich um Kugelschäume: bei SB 2 und SB 285 auf Tensid- und bei SB 31 auf Proteinhydrolysatbasis (Eiweißschaum). Nach dem Erstarren und Erhärten des Bindemittels bleiben kugelige Luftporen zurück, die von der festigkeitsbildenden Bindemittelmatrix umgeben werden. Reste des Schaumbildners verbleiben als nm-dicke Schicht an der Porenwandung, die von Bindemittelpartikeln durchdrungen ist. Bild 21 zeigt Schaumbildnerrelikte in einem Schaummörtel aus HAZ (= Bindemittel aus 85 % Hüttensand, 10 % Anhydrit und 5 % PZ, siehe 4.4) in 1300facher Vergrößerung.

Bild 21: Schaumbildnerrelikte in einem Schaummörtel aus HAZ in 1300facher Vergrößerung (FE-REM-SE-Aufnahme nach Kryopräparation)

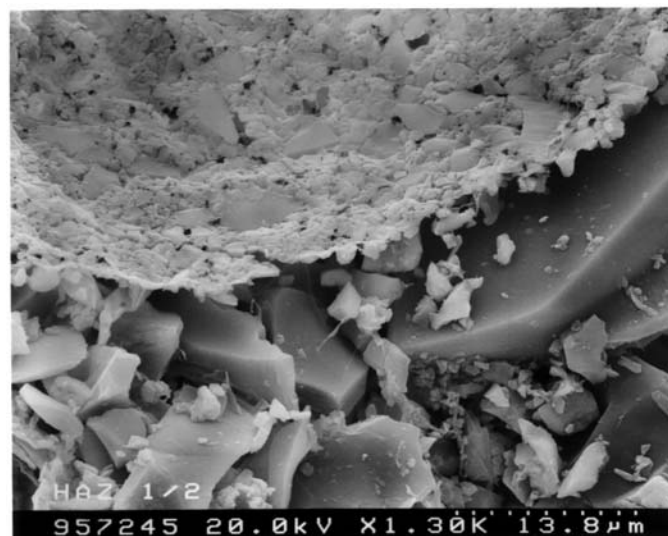
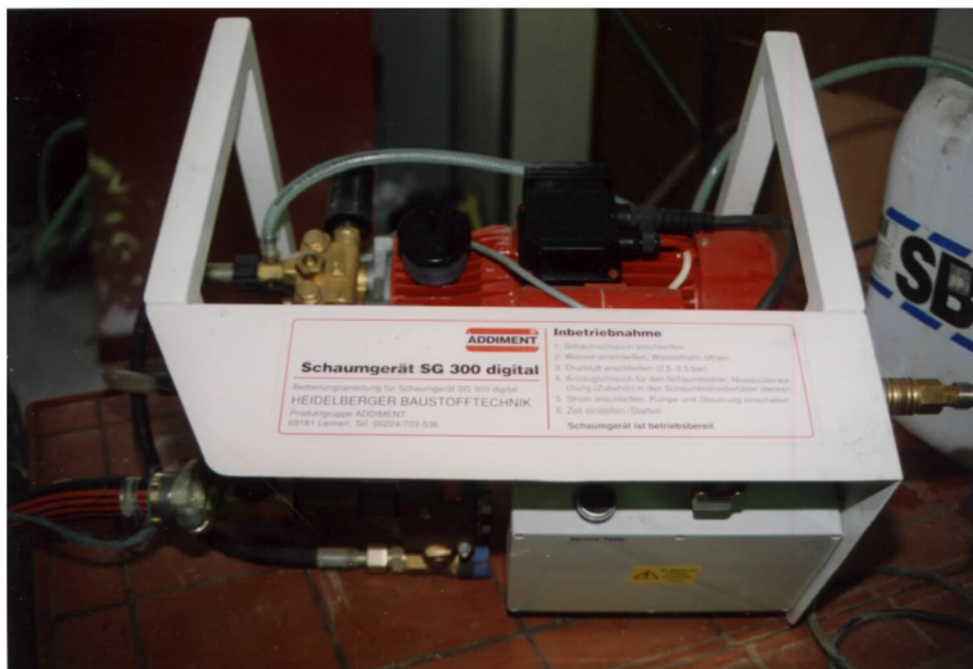


Tabelle 9: Inhaltstoffe und technische Daten der Schaumbildner

	SB 2	SB 31	SB 285
Inhaltsstoff	Organische Tenside	Proteinhydrolysat (40 % der flüss. Bestandteile: organisch, 60 % anorganisch)	Gemisch aus anionischen und nichtionischen Tensiden k.A. k.A.
davon Feststoffgehalt und Wassergehalt	38,2 % 61,8 %		
einzustellende Rohdichten	1 ... 2 kg/dm ³	< 1 kg /dm ³	0,4 ... 1,6 kg/dm ³
Dichte bei 20 °C	1,02 kg/dm ³	1,11 kg/dm ³	1,02 kg/dm ³
Schaumdichte bei 20°C	ca. 25 kg/m ³	ca. 25 kg/m ³	ca. 60 kg/m ³
pH-Wert	7,5	7,0	9,1
Schmelzpunkt (1 bar)	0 °C	0°C	k.A.
Siedepunkt (1 bar)	100 °C	100 °C	k.A.
Thermische Zersetzung	oberhalb 400 °C	k.A.	k.A.
Viskosität (20 °C)	ca. 8 mPas	ca. 40 mPas	k.A.
Form	flüssig	flüssig	flüssig
Geruch	aromatisch	charakteristisch	k.A.
Farbe	blau	dunkelbraun	hellgelb
Biologischer Abbau	gut abbaubar	gut abbaubar	
Wassergefährdungs- klasse	1 - schwach wassergefährdend	1 - schwach wassergefährdend	2 - wassergefährdend

Als Gerät zur Schaumerzeugung wurde für alle drei Schaumbildner das Schaumgerät SG 300 (Bild 22) von ADDIMENT verwendet.

Bild 22: Schaumgerät



4.3.1.2 Schaumstabilität und Stabilisierer

Der Stabilisierer wird dem Mörtel zugesetzt, um die Stabilität des Schaumes sowie das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels zu erhöhen und um Entmischungen entgegenzuwirken. Durch die Viskositäts-erhöhung werden die Luftporen stabilisiert und die Pumpfähigkeit kann verbessert werden. Die Zugabe erfolgt zur Trockenmischung (Bindemittel) oder direkt ins Anmachwasser. Bei allen im folgenden beschriebenen Versuchen erfolgte die Zugabe zum Bindemittel. In Verbindung mit den Schaumbildnern SB 2 und SB 31 von ADDIMENT wurde der Stabilisierer ST 2 von ADDIMENT eingesetzt. Bei den Schaummörteln mit dem Schaumbildner SB 285 wurde der Stabilisierer ST 61 von WOERMANN verwendet. Tabelle 10 beschreibt die Inhaltstoffe und technischen Daten der Stabilisierer.

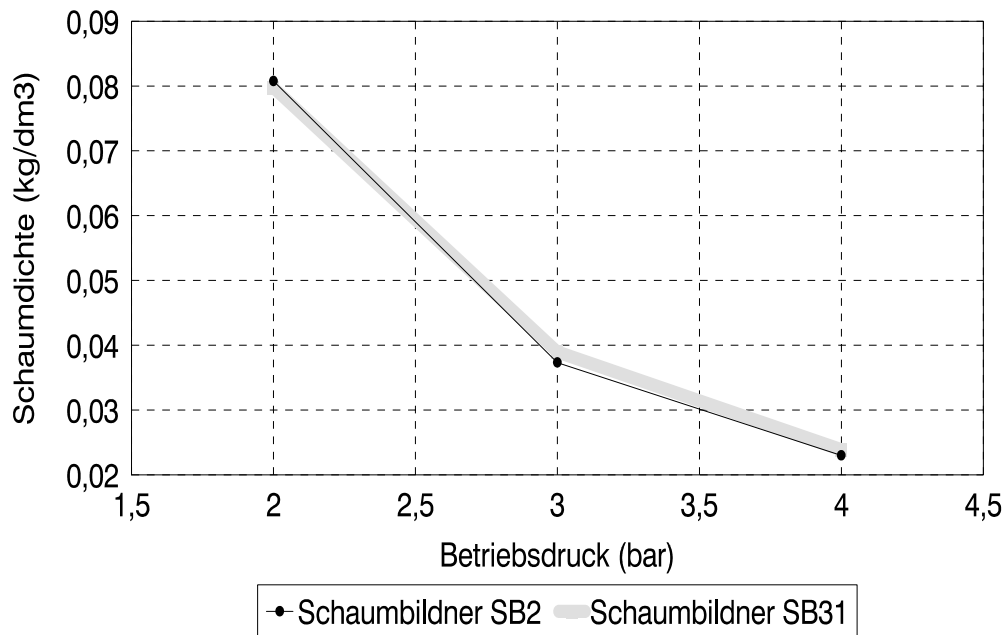
Tabelle 10 : Inhaltstoffe und technische Daten der Stabilisierer

	ST 2	ST 61
Inhaltstoffe	Cellulose-Ether	Chloridfreie Polymersubstanz
Dichte	860 kg/m ³ (Schüttdichte)	1,01 g/cm ³
Dosierung	0,2 - 0,7 % v. Zementgewicht	0,3 - 2,0 l/m ³
Farbe	grau	violett
Form	Pulver	flüssig
pH-Wert	9,4 (100 g/ 1 l H ₂ O)	8,0 (Cl ⁻ < 0,1 %)
Gefahrenhinweis	kein Gefahrstoff	kein Gefahrstoff
Therm. Zersetzung	oberhalb 230 °C	k.A.

4.3.2 Technologischer Ablauf und Gerätetechnik

Die separate Schaumerzeugung für die Herstellung des Injektionsschaummörtels erfolgt mit dem SG 300 von ADDIMENT durch die Verwirbelung des Wasser-Schaumbildner-Gemisches innerhalb der Treibstrahlstrecke eines Injektorsystems, wobei nach dem anschließenden Druckabfall (Entspannung) nach dem Injektordurchgang die Schaumbildung einsetzt. Innerhalb des Schlauchweges des Schaumaustrittschlauches kommt es zum weiteren Aufschluß des Schaumbildners [15]. Zur Schaumerzeugung werden unterschiedliche Schaumergeräte angeboten. Im Rahmen der Voruntersuchungen zur Schaumporenverteilung und Schaumdichte nach unterschiedlichen Standzeiten des Schaumes erwies sich das Schaumergerät SG 300 als geeignetste Variante zur Erzielung eines stabilen, feinporigen Schaumes in gleichbleibender Qualität. Wie bereits unter 4.3.1 erwähnt, lassen sich über die Betriebsdruckeinstellungen am Schaumergerät bei gleicher Schaumbildnerkonzentration unterschiedliche Schaumdichten erzeugen, die wiederum Einfluß auf die Frisch- und damit Festmörteleigenschaften des Injektionsschaummörtels haben (Bild 23).

Bild 23:



Der technologische Ablauf der Schaummörtelherstellung und eine mögliche Gerätekonfiguration sind den Bildern 24 und 25 zu entnehmen. Das Verfahren entspricht demzufolge Variante d): Mischen eines fließfähigen Mörtels mit einem vorgefertigten Luftporenschaum, diskontinuierlich im offenen System. Nach dem Vermischen des trockenen Bindemittels mit dem Stabilisierer wird mit dem optimierten Wassergehalt eine homogene Bindemittelsuspension hergestellt. Zum Mischen haben sich bei kleinen Mörtelmengen Rührgeräte mit Ständer und Mörtelkübel (z.B. COLLOMIX-Gerät in Bild 25) bewährt. Bei größeren Durchsätzen an Injektionsmörtel sind Zwangsmischer zu bevorzugen. Die Drehzahl des Mischwerkzeuges muß einstellbar sein, da für die Mischung eines agglomeratfreien Bindemittelleimes höhere Drehzahlen erforderlich sind als beim nachfolgenden Unterziehen des Schaumes. Die Dosierung des Schaumes erfolgt volumetrisch mittels einer konstanten, am Schaumgerät einstellbaren Schaumförderzeit. Eine Kontrolle des volumetrischen Verhältnisses von Bindemittelleim zum Schaum im Mörtelkübel ist durch Messung der Füllstandshöhe des Bindemittelleimes, des Bindemittelleimes mit Schaum (direkt nach der Dosierung) und des fertig gemischten Schaummörtels möglich.

Bild 24:

Technischer Ablauf einer Injektion mit Schaummörtel

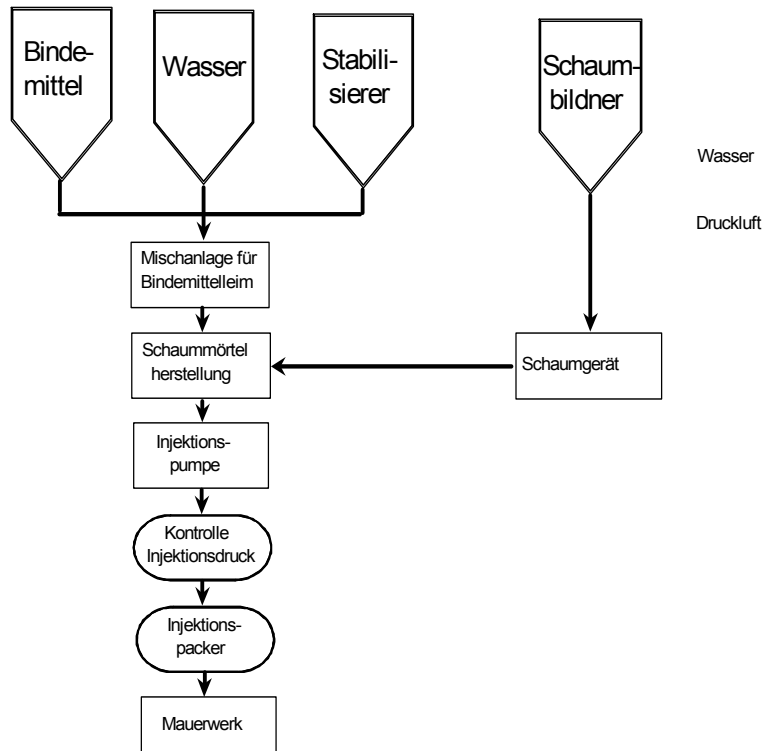


Bild 25: Geräteausstattung zur Schaummörtelherstellung in kleintechnischem Maßstab



Die Bilder 26 bis 29 zeigen die drei Phasen der Schaummörtelherstellung: vom Mischen des Bindemittelleimes (Bild 26), über das Dosieren des extern erzeugten Schaumes (Bild 27), das Untermischen des Schaumes (Bild 28) bis zum fertigen Schaummörtel (Bild 29).

Bild 26: Mischen des Bindemittelleimes



Bild 27: nach der Schaumdosierung



Bild 28: Untermischen des Schaumes



Bild 29: fertiger Schaummörtel



Die Applikation des Schaummörtels erfolgt als Niederdruckinjektion (< 6 bar) über Packer ins Mauerwerk. Als Packer eignen sich Injektionspacker (i.d.R. aus Stahl) mit Innendurchmessern zwischen 12 mm und 20 mm, die für Zementleiminjektionen in verschiedenen Ausführungen ohne oder mit Kugelhahn bzw. auch mit Manometer zur Beobachtung des Druckaufbaus am Mauerwerkseingang im Spezialhandel angeboten werden. Bewährt haben sich insbesondere bei großem Hohlraumvolumen auch PE-Rohrmaterialien, die nach entsprechender Füllung der Packeröffnung mit Stopfen oder durch Abknicken des herausstehenden Rohrabschnittes geschlossen werden können. Das Anbringen der Packer am Bauwerk erfolgt durch Einschlagen oder Einmörteln nach vorangegangenem Bohren bis zur gewünschten Mauerwerkstiefe.

Der Schaummörtel wird analog zu herkömmlichen Injektionsmörteln mittels einer Pumpe gefördert, wobei die Art der Pumpe einen großen Einfluß auf die Qualität des Schaummörtels hat. Bewährt haben sich Exzentrerschneckenpumpen (Nennleistung ≥ 2 m³/h, Nenndruck: ca. 6 bar), da durch den Fördervorgang im Vergleich zu Kolbenpumpen nur ein geringer Anteil der Schaumporen zerstört wird. Als Maß für die Anwendbarkeit einer Pumpe zur Schaummörtelförderung wird die Differenz zwischen der Frischmörtelrohddichte vor und nach dem Pumpen herangezogen. Diese Differenz sollte 0,3 kg/dm³ nicht übersteigen, da ansonsten davon auszugehen ist, daß die projektierten, besonderen Festmörtel­eigenschaften des Injektionsschaummörtels nicht gewährleistet werden können.

4.4 Charakterisierung der verwendeten Bindemittel

Je nach den stofflichen, mörteltechnischen, bauphysikalischen und statischen Anforderungen an den Injektionsmörtel am konkreten Objekt sind grundsätzlich unterschiedliche hydraulische Bindemittelarten wie z.B. Portlandzemente, Hochofenzemente oder hochhydraulischer Kalk als Basis für den Injektionsschaummörtel möglich. Für die im folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden fünf Bindemittel ausgewählt. Dabei handelt es sich um drei handelsübliche Zemente nach DIN 1164-1, Teil 1: einen C₃A-armen, hochsulfatwiderstandsfähigen Portlandzement CEM I 42,5 R-HS (bisher: PZ 45 F-HS), einen C₃A-reichen Portlandzement CEM I 42,5 R (bisher: PZ 45 F) und einen hüttensandreichen, hochsulfatwiderstandsfähigen Hochofenzement CEM III/B 32,5 -NW/HS (bisher: HOZ 35 L-NW/HS), ein im Rahmen eines BMBF-Forschungsprojektes von Knöfel [22] und Sattler [45] speziell für gipshaltiges Mauerwerk entwickeltes Bindemittel aus Hüttensand, Anhydrit und Zement (HAZ) in Anlehnung an den früher genormten Sulfathüttenzement [A5] sowie einen natürlichen hochhydraulischen Kalk (Romankalk), der insbesondere in der Denkmalpflege häufig eingesetzt wird.

Zur Charakterisierung der verwendeten Bindemittel wurden chemische, physikalische und phasenanalytische Untersuchungen durchgeführt.

4.4.1 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung und physikalische Kennwerte

In Tabelle 12 sind die chemischen Analysen und - soweit bestimmbar - die mineralische Zusammensetzung nach Bogue (bei den Portlandzementen) bzw. der halbquantitative röntgenografische Mineralbestand dokumentiert. Der Hüttensand als Hauptbestandteil des CEM III 32,5 -NW/HS (HOZ 35 L-NW/HS) und HAZ wurde aufgrund seines glasigen Zustands mittels Differenzthermoanalyse identifiziert. Die spezifische Oberfläche, die Reindichte sowie die Ergebnisse der Korngrößenanalysen der Bindemittel mit dem Coulter LS 130 veranschaulichen Tabelle 11 und Bild 30.

Tabelle 11: Spezifische Oberfläche, Reindichte und Korngrößenkennwerte

	CEM I 42,5R-HS <i>PZ 45 F-HS</i>	CEM I 42,5R <i>PZ 45 F</i>	HAZ	CEM III/B 32,5 - NW/HS <i>HOZ 35 L-NW/HS</i>	Romankalk
A _O cm ² /g	3700	4000	3800	3800	7400
ρ _r g/cm ³	3,21	3,12	2,97	2,96	2,70
R ₉₀ %	0,13	0,41	1,66	0,22	12,35
R ₆₃ %	1,28	1,37	3,75	1,50	21,2
R ₄₀ %	7,23	6,21	13,88	9,24	32,51
d ₅₀ μm	10,7	11,05	13,9	14,1	17,3
d _m μm	15,2	15,9	20,3	18,0	36,4

Tabelle 12: Chemische Analyse und Phasenzusammensetzung der Bindemittel

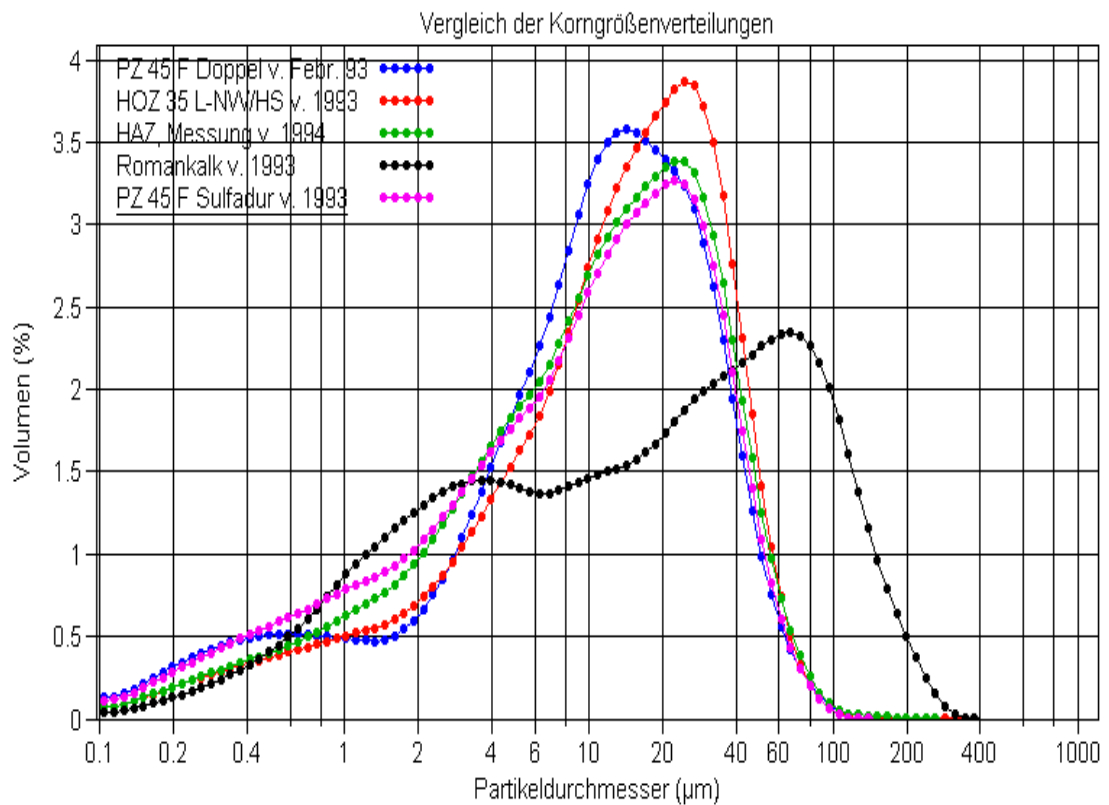
		CEM I 42,5R-HS <i>PZ 45 F-HS</i>	CEM I 42,5R <i>PZ 45 F</i>	HAZ	CEM III 32,5 - NW/HS <i>HOZ 35L-NW/HS</i>	Romankalk
GV	%	1,30	3,20	-	0,20	16,30
CaO	%	64,20	64,00	42,90	47,30	39,60
SiO ₂	%	21,50	20,70	32,10	28,00	25,80
Al ₂ O ₃	%	4,00	5,50	10,30	11,00	9,40
Fe ₂ O ₃	%	6,10	2,10	0,98	1,40	2,70
MgO	%	0,20	0,80	6,80	3,40	0,90
K ₂ O	%	0,52	0,96	0,73	0,95	1,64
Na ₂ O	%	0,11	0,12	0,34	0,39	0,20
SO ₃	%	2,20	2,90	5,10	3,90	2,90
Cl ⁻	%	<0,01	<0,01	<0,01	0,012	n.b.
CaO _{frei} 1)	%	0,40	1,50	-	-	-

		CEM I 42,5R-HS <i>PZ 45 F-HS</i>	CEM I 42,5R <i>PZ 45 F</i>	HAZ	CEM III 32,5 - NW/HS <i>HOZ 35L-NW/HS</i>	Romankalk
KSt I		90	92	-	-	-
TM		0,65	2,70	-	-	-
SM		2,13	2,72	-	-	-
Na ₂ O _{äqu}	%	0,45	0,75	-	-	-
C ₃ S	%	56,1	50,7	++	+	-
C ₂ S	%	19,0	20,8	+	+	+++
C ₃ A	%	0,2	11,2	+	(+)	++
C ₄ AF	%	18,6	6,2	+	(+)	+
Gips/ Anhydrit		+	+	+	+	+
Ca(OH) ₂		-	-	-	-	++
CaCO ₃		-	-	-	-	+

Halbquantitative röntgenografische Erfassung:

- ++++ ... hohe Intensität
- + ... niedrige Intensität
- (+) ... Nachweis unsicher
- ... nicht nachgewiesen
- 1) ... bestimmt nach Franke

Bild 30:



4.4.2 Mörteltechnische Kenngrößen

Tabelle 13 zeigt die mörteltechnischen Kennwerte der Zemente gemäß DIN EN 196 und des hydraulischen Kalkes (Romankalk) gemäß DIN 18555 Teil 3.

Tabelle 13: Wichtige mörteltechnische Eigenschaften

	CEM I 42,5R- HS <i>PZ 45 F-HS</i>	CEM I 42,5R <i>PZ 45 F</i>	HAZ	CEM III/B 32,5- NW/HS <i>HOZ 35L-NW/HS</i>	Romankalk
Erstarr.Anf. (h:min)	2:03	1:50	3:42	4:09	n.b.
Ende (h:min)	3:16	2:48	5:58	5:04	n.b.
Druckfestigkeit					
### _{D,2} (N/mm ²)	22,3	29,9	7,3	13,0	n.b.
### _{D,7}	40,3	42,6	17,6	28,3	2,9
### _{D,28}	54,5	50,1	30,5	44,0	5,2
Biegezugfestigkeit					
### _{BZ,2}	5,4	5,9	2,0	3,5	n.b.
(N/mm ²)	7,5	7,8	4,6	6,1	1,3
### _{BZ,7}	8,9	9,0	7,7	8,1	2,2
### _{BZ,28}					
Wasseranspruch (%)	25,7	26,7	31,5	31,7	36,4

4.5 Frischmörteleigenschaften des Injektionsschaummörtels

Anforderungen hinsichtlich der Frischbeton- bzw. Frischmörteleigenschaften gemäß DIN 4164 [A1] existieren nicht. Die detaillierte Untersuchung der Frischmörteleigenschaften ist jedoch in Verbindung mit dem Schaummörtel von besonderer Bedeutung, da die entsprechende Schaumdosierung zum Erreichen der angestrebten Festmörteleigenschaften nur über bestimmte, auch unter baupraktischen Bedingungen durchführbare Frischmörtelprüfungen kontrolliert werden kann. Dazu gehören das Ausbreitmaß, die Frischmörtelrohddichte, der Luftporengehalt und das Wasserrückhaltevermögen.

Die Ergebnisse aller Frischmörtelprüfungen an den fünf Bindemitteln mit und ohne Schaum bei konstantem Wasser-Bindemittel-Wert von 0,5 und konstantem Verhältnis Bindemittelleim zu Schaum von 2 : 1 sind in Tabelle 15 dargestellt. Da es sich nicht im eigentlichen Sinne um Mörtel sondern um Bindemittelleime bzw. Schaummörtel handelt, wurde nicht ein einheitliches Ausbreitmaß angestrebt, sondern gleiche Wasser-Bindemittel-Werte sowie gleiche Verhältnisse Bindemittelleim zu Schaum. Für alle folgenden Versuche wurden der Schaumbildner SB 2 sowie der Stabilisierer ST 2 verwendet. Vor den Frischmörteluntersuchungen wurde das Schäumvermögen des Schaumbildners (nach der Wasserzugabe am Schaumgerät) gemäß DIN 53902 Teil 1

[A2] durch Schlagen von Hand bei 20°C bestimmt. Das Schaumvolumen des Schaumbildners SB 2 bezogen auf das Schaumvolumen der Vergleichslösung gemäß DIN 53902 Teil 1, Abschnitt 7 beträgt 300 %.

4.5.1 Frischmörtelrohichte und Luftporengehalt

Beide Prüfungen erfolgen mit dem Luftporengehaltprüfer nach DIN 18555 Teil 2 [A14]. Eine Verdichtung durch Vibration ist bei diesem fließfähigen Mörtel aufgrund seiner speziellen Applikation durch Pumpen nicht sinnvoll.

4.5.2 Ausbreitmaß

Die Bestimmung des Ausbreitmaßes erfolgt in Anlehnung an DIN 18555 Teil 2 [A4] mit dem Ausbreittisch mit Setztrichter nach DIN 1060 Teil 3 [A13]. Während des Einfüllens des Bindemittelleimes bzw. des Schaummörtels wird der Setztrichter fest auf die Glasplatte gedrückt. Auf die übliche Verdichtung durch kurze Stöße mit dem Stampfer und die 15 Hubschläge wird bei diesem speziellen Mörtel verzichtet. Deshalb ist die Zuordnung der Frischmörtel zu den Konsistenzbereichen nach DIN 18555 Teil 2 nur mit Vorbehalt möglich, im Sinne einer baupraktischen Prüfung zur Überwachung jedoch auch nicht erforderlich.

4.5.3 Erstarrungsverhalten

Das Erstarrungsverhalten wurde an zwei ausgewählten Bindemittelleimen mit und ohne Schaum bzw. mit und ohne Stabilisierer unter Verwendung der Geräteanordnung gemäß EN 196 "Prüfverfahren für Zement" Teil 3 [A8] untersucht (Tabelle 14) . Eine Zuordnung zu den Grenzwerten gemäß DIN 1164 Teil 1 [A11] kann jedoch nicht vorgenommen werden, da die Dosierung des Anmachwassers nicht gemäß des Wasseranspruchs nach EN 196 Teil 3 erfolgte, sondern wiederum der einheitliche Wasser-Bindemittel-Wert von 0,5 eingestellt wurde. Vergleichend läßt sich anhand dieser Prüfung jedoch ermitteln, daß der Schaum und der Stabilisierer leicht verzögernd wirken. Das Erstarrungsende liegt im zulässigen Bereich gemäß EN 196 Teil 3 [A8].

Tabelle 14: Erstarrungsverhalten in Gegenwart des Schaumes und des Stabilisierers

	Erstarrungsbeginn in h	Erstarrungsende in h
CEM I 42,5 R-HS	3 : 05	4 : 25
CEM I 42,5 R-HS + ST 2	3 : 25	5 : 20
CEM I 42,5 R-HS + SM	3 : 45	5 : 10
CEM I 42,5 R-HS + ST + SM	3 : 20	5 : 40

4.5.4 Wasserrückhaltevermögen

Das Wasserrückhaltevermögen der Bindemittelleime mit und ohne Schaum wird nach DIN 18555 Teil 7 [A14] geprüft. Zur besseren Vergleichbarkeit (Bindemittelleim mit

und ohne Schaum) wurde bei diesen Versuchen jeweils beiden Mischungen Stabilisierer zugegeben, um tatsächlich nur den Einfluß des Schaumes zu erfassen.

Tabelle 15: Frischmörteleigenschaften von Bindemittelleimen und Schaummörteln

BM	Bindemittelleim				Schaummörtel			
	a (cm)	### _f (kg/dm ³)	LP (Vol%)	WRV (%)	a (cm)	### _f (kg/dm ³)	LP (Vol%)	WRV (%)
CEM I 42,5 R-HS	26	1,78	4,3	83,2	18,0	1,31	27,0	85,8
CEM I 42,5 R	26	1,78	4,0	n.b.	18,0	1,30	25,0	n.b.
CEM III/B 32,5 NW/HS	20,5	1,76	2,7	83,7	17,0	1,42	20,5	86,4
HAZ	22,5	1,74	3,6	85,0	19,5	1,23	30,0	87,4
Romankalk	18,8	1,70	3,8	95,8	19,2	1,43	18,0	98,0

Beim Vergleich der Frischmörteleigenschaften der Bindemittelleime mit und ohne Schaum wird deutlich, daß sich der Schaumzusatz erwartungsgemäß am stärksten auf die Frischrohddichte und den Luftporengehalt auswirkt. In Abhängigkeit von der Bindemittelart liegt der Zuwachs bei dem gewählten Schaumanteil zwischen ca. dem 5fachen des Ausgangsluftporengehaltes beim Romankalk und beim CEM I 42,5 R-HS und ca. dem 7fachen beim HAZ. Die Frischmörtelrohddichte sinkt um Werte zwischen 0,51 kg/dm³ beim HAZ und 0,27 kg/dm³ beim Romankalk. Die Ausbreitmaße nehmen in Gegenwart des Schaumes ab, wodurch der Bindemittelleim von einer fließfähigen in eine nahezu plastische Konsistenz übergeht. Die einzige Ausnahme bezüglich der Ausbreitmaße stellt der Romankalk dar, hier nimmt das Ausbreitmaß in Gegenwart des Schaumes zu. Eine Abnahme des Ausbreitmaßes durch den Schaum wie bei den anderen Bindemitteln zeigt der Romankalk erst bei höheren Wasser-Bindemittel-Werten, die aufgrund der großen spezifischen Oberfläche infolge seines Gehaltes an gelöschtem Kalk (siehe 4.3) erforderlich werden. Möglicherweise gibt es auch Wechselwirkungen zwischen dem Schaumbildner und dem Luftporenbildner, der dem Romankalk nach Angaben des Herstellers bereits werkseitig bei der Mahlung zugegeben wird. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde jedoch kein erhöhter LP-Gehalt im Bindemittelleim aus Romankalk festgestellt (Tabelle 15).

Die Ausbreitmaße korrelieren sehr gut mit den Wasseransprüchen nach DIN EN 196 Teil 3 [A8] (siehe Tabelle 13): mit zunehmendem Wasseranspruch des Bindemittels nimmt bei konstantem W/B-Wert das Ausbreitmaß ab.

Das Wasserrückhaltevermögen der Bindemittelleime wird durch den Schaum verbessert. Da der Stabilisierer beiden Mischungen mit und ohne Schaum zugegeben wurde, ist die Verbesserung tatsächlich auf die Wirkung des Schaumes zurückzuführen. Im Vergleich der Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen wird deutlich, daß sich der gleiche Schaumanteil bei einheitlichem Wasser-Bindemittel-Verhältnis bei den verschiedenen Bindemitteln sehr differenziert auswirkt. Während sich die Frischmörteleigenschaften beim CEM I 42,5 R-HS und HAZ durch den Schaumzusatz sehr stark verändern, sind die Auswirkungen beim CEM III/B 32,5 -NW/HS und Romankalk wesentlich schwächer.

Auffällig sind die großen Unterschiede im Verhalten in Gegenwart des Schaumes beim CEM III/B 32,5 -NW/HS und HAZ, die als hüttensandreiche, zementhaltige Bindemittel eine ähnliche Zusammensetzung aufweisen. Einen möglichen Ansatz zur Klärung liefert die unterschiedliche Art und Weise der Anregung des latent hydraulischen Hüttensandes, die beim CEM III/B 32,5 -NW/HS alkalisch und beim HAZ sulfatisch erfolgt.

4.5.5 Einfluß variiertes Wasser-Bindemittel-Werte und unterschiedlicher Schaumanteile auf die Frischmörteleigenschaften

Die Bilder 31 bis 33 veranschaulichen den Einfluß des Wasser-Bindemittel-Wertes auf das Ausbreitmaß (Bild 31), das Wasserrückhaltevermögen (Bild 32) und die Frischmörtelrohichte (Bild 33) des reinen Bindemittelleimes (BM_{pur}) und des Schaummörtels ($BML:SM = 2 : 1$) am Beispiel des CEM I 42,5 R-HS.

Bei allen drei Frischmörtelkenngrößen ist ein deutlicher Einfluß des W/B-Wertes des Bindemittelleimes auf die Eigenschaften des Schaummörtels zu verzeichnen. Besonders stark wirkt sich das veränderte Wasser-Bindemittel-Verhältnis auf das Wasserrückhaltevermögen aus. Bei Zunahme des W/B-Wertes von 0,4 auf 0,5 verringert sich das Wasserrückhaltevermögen um 9 %. Je nach Art des zu injizierenden Mauerwerkes (dichtes oder stark saugendes Mauerwerk), des einzusetzenden Bindemittels und der Zielrohichte bzw. Zielfestigkeit muß das W/B-Verhältnis des Bindemittelleimes vor der Schaumzugabe ausgewählt werden.

Bild 31:

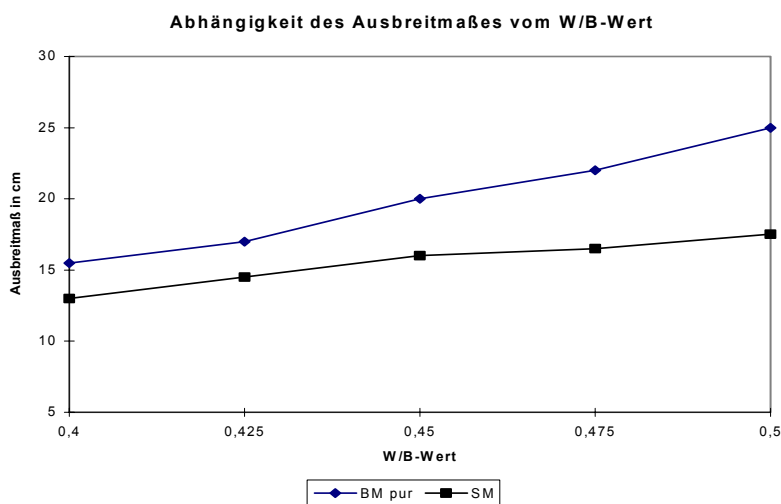


Bild 32:

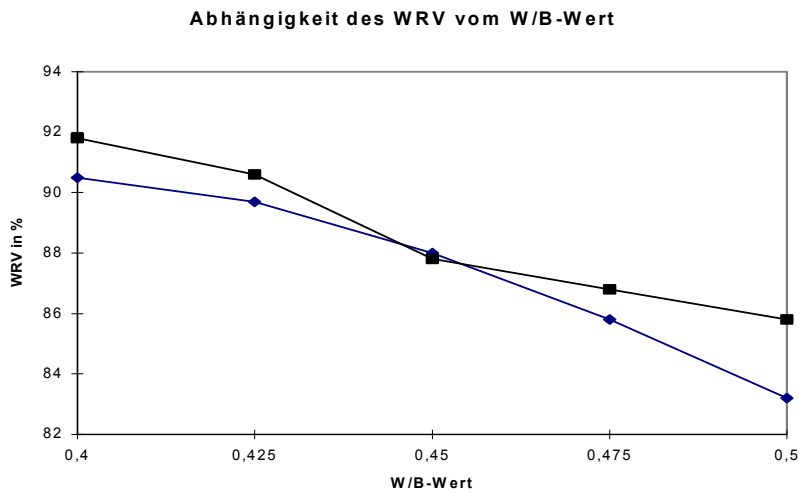
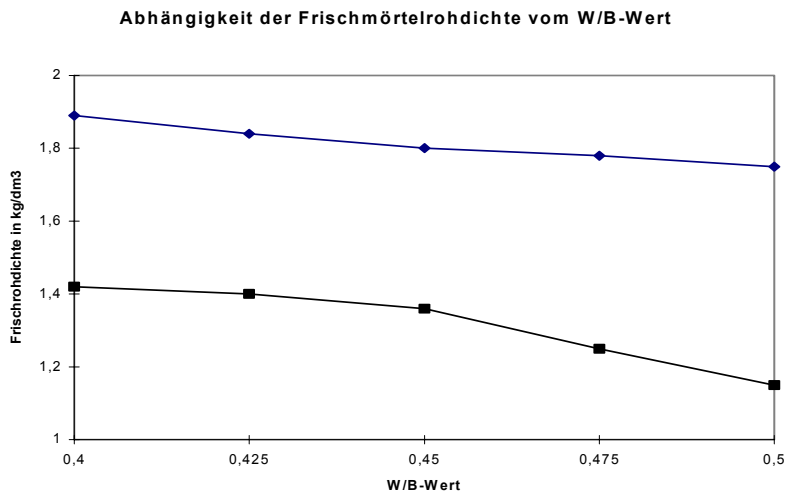


Bild 33:



In den Tabellen 16 und 17 ist der Einfluß des Schaumanteiles auf die Frischmörtelrohichte und den Luftporengehalt für die Bindemittel CEM I 42,5 R-HS und den HAZ vor dem Pumpvorgang dokumentiert.

Tabelle 16: Einfluß des Schaumanteiles auf die Frischmörtelrohichte und den Luftporengehalt beim CEM I 42,5 R-HS

Schaumanteil BML : SM in %	Frishmörtelrohichte in kg/dm ³	Luftporengehalt in Vol%
0	1,78	4
25 3 : 1	1,38	24
33,3 2 : 1	1,11	32
50 1 : 1	0,88	49
75 1 : 3	0,40	73

Tabelle 17: Einfluß des Schaumanteiles auf die Frischmörtelrohichte und den

Luftporengehalt beim HAZ

Schaumanteil BML : SM in %		Frischmörtelrohddichte in kg/dm ³	Luftporengehalt in Vol%
0		1,74	4
25	3 : 1	1,17	23
33,3	2 : 1	1,04	38
50	1 : 1	0,77	51
75	1 : 3	0,27	78

In Abhängigkeit von der Art des Bindemittels nimmt mit zunehmendem Schaumanteil erwartungsgemäß die Frischrohddichte ab, während der Luftporengehalt ansteigt.

4.5.6. Rheologische Untersuchungen

Die rheologische Beurteilung von Flüssigkeiten erfolgt durch den Scherversuch. Dazu wird an einer dünnen Flüssigkeitsschicht die Änderung der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ in Abhängigkeit von der aufgebracht Scherspannung τ untersucht. Den Differentialquotienten aus Geschwindigkeit und Schichtdicke bezeichnet man als Schergeschwindigkeitsgefälle D . Es werden folgende Grund-Fließverhalten unterschieden: idealviskos (Newton), pseudoplastisch (Ostwald und Steiger/Ory), dilatant (Ostwald) und plastisch (Bingham und Casson). Zementleime können in die Gruppe der strukturviskosen Bingham-Medien eingeordnet werden, da sie eine Fließgrenze τ_0 besitzen und ihre Viskosität mit zunehmender Belastung abnimmt.

Mit Hilfe der Darstellung des Geschwindigkeitsgefälles in Abhängigkeit von der Scherspannung können die dynamische Viskosität und die Fließgrenze zur vergleichenden Charakterisierung unterschiedlicher Zementleime bzw. -mörtel ermittelt werden.

Die rheologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen werden durch die Struktur beeinflusst, die sich nach dem Anmachen des Zementes mit Wasser bildet. Einflußfaktoren sind die Feststoffkonzentration (W/Z-Wert), die Kornform und -größenverteilung der Zementpartikel, die Mischdauer, -intensität und Temperatur, die chemische Zusammensetzung des Zementes, die Reaktivität der Klinkerphasen, der Gehalt und die Form des Sulfatträgers sowie das Alter der Zementsuspension (Ausbildung der Hydratationsprodukte).

4.5.6.1 Untersuchungen mittels Viscomat

Für die rheologischen Untersuchungen wurde der Viskomat PC der Fa. Scheiblinger verwendet. Mit dem Viscomat PC werden geräteabhängige Größen gemessen, weshalb anstelle der Viskosität η der sogenannte g-Wert und anstelle der Fließgrenze τ_0 der sogenannte h-Wert angegeben werden.

Das Meßgerät besteht aus einem Meßzylinder für die Mörtelprobe (ca. 0,4 dm³), der auf eine rotierende Welle aufgesteckt wird. In den rotierenden Mörtel wird ein konzentrisches Paddel getaucht. Die Form des Paddels ist so gestaltet, daß eine

Entmischung des Mörtels während der Messung verhindert wird. Der Abstand zwischen Meßtopfinnenwand und Mischpaddel gestattet Messungen bis zu einer Zuschlag Korngröße von 2 mm.

Vor den Messungen wurden die Meßzeiten und die Drehgeschwindigkeiten des Meßtopfes festgelegt. Das Meßprofil umfaßte folgende Stufen:

- 10 Minuten bei 140 U/min
 - 2 Minuten bei 120 U/min
 - 2 Minuten bei 100 U/min
 - 2 Minuten bei 80 U/min
 - 2 Minuten bei 60 U/min
 - 2 Minuten bei 40 U/min
- (Gesamtmeßzeit 20 Minuten)

Die Messung erfolgte jeweils 4 Minuten nach der Wasserzugabe zum Zement nach Abschluß des Mischvorganges im Mörtelmischer gemäß EN 196 [A8]. Die Temperatur während der Messung betrug 20°C. Zur Veranschaulichung des Zeiteinflusses erfolgten die Messungen bei der Mischung 2 (HS-Zement mit einem Bindemittelleim-Schaum-Verhältnis von 2 : 1) nach 4 Minuten (M 2.1) und 14 Minuten (M 2.2) nach Abschluß des Mischvorganges.

In Auswertung der Meßergebnisse erhält man zwei Kenngrößen, den g-Wert und den h-Wert. Anhand dieser Werte können Aussagen über die Fließgrenze und die Viskosität und damit über die Injizierbarkeit und Pumpfähigkeit des Mörtels getroffen werden . Die Tabelle 18 sowie die Bilder 34 und 35 zeigen die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen.

Tabelle 18: Ergebnisse rheologischer Untersuchungen an CEM I 42,5R-HS und HAZ

Mischung-Nr.	BML : SM	ρ_{frisch} in kg/dm ³	g-Wert in Nmm	h-Wert in Nmm min
CEM I 42,5 R-HS				
1	ohne SM	1,78	9,29	0,102
2.1	2 : 1	1,16	18,9	0,105
2.2	2 : 1	1,16	19,18	0,124
3	1 : 1	0,75	22,17	0,092
HAZ				
4	ohne SM	1,74	12,90	0,138
5	2 : 1	1,2	44,21	0,168
6	1 : 1	0,74	35,23	0,141

Bild 34: g-Werte in Abhängigkeit vom Bindemittel und Schaumanteil

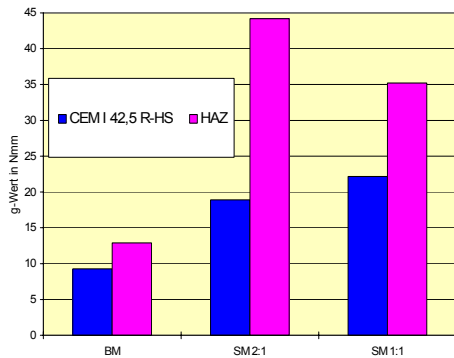
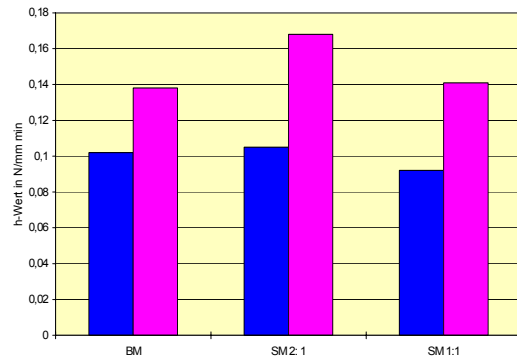


Bild 35: h-Werte in Abhängigkeit vom Bindemittel und Schaumanteil



Die Zementsuspensionen aus CEM I 42,5 R-HS weisen ohne und mit Schaum niedrigere Fließgrenzen (erfaßt als g-Wert) und Viskositäten (erfaßt als h-Wert) auf als die Zementsuspensionen bzw. Schaummörtel aus HAZ, was mit dem höheren Wasseranspruch des HAZ korreliert (siehe Punkt 4.4.2). Die Fließgrenze ist bei allen Schaummörteln größer als bei den Zementsuspensionen. Die Viskosität bleibt nahezu unverändert bzw. nimmt ab einem bestimmten Schaumanteil ab.

Nach einer 10minütigen Standzeit des Schaummörtels (M 2.2.) nehmen die Fließgrenze und die Viskosität gegenüber der frisch gemischten Probe (M 2.1) zu.

4.5.6.2 Untersuchung des Fließverhaltens mittels Marshtrichter und Auslaufbecher

Die Auslaufzeit aus dem Marshtrichter ist eine Kennzahl, mit der das Fließverhalten von Suspensionen auf einfache Weise, d.h. auch auf der Baustelle, beschrieben werden kann. Sie ist ein Relativwert zur Beschreibung der komplexen Fließigenschaften. Gemessen wird die Zeit t_M in Sekunden (Tabelle 19), die 1000 cm^3 Suspension benötigen, um aus dem Marshtrichter auszulaufen (Füllinhalt 1500 cm^3 , Durchflußöffnung $d = 4,76 \text{ mm}$).

Tabelle 19: Auslaufzeiten aus dem Marshtrichter

BML : SM-Verhältnis	Auslaufzeit in s nach einer Standzeit ab Mischbeginn von		
	4 min	15 min	30 min
CEM I 42,5 R-HS			
ohne SM	100	212	n.m.
ohne SM mit ST	476	n.m.	n.m.
2 : 1	n.m.	n.m.	n.m.
1 : 1	n.m.	n.m.	n.m.
HAZ	n.m.	n.m.	n.m.
ohne SM	n.m.	n.m.	n.m.
ohne SM mit ST	n.m.	n.m.	n.m.
2 : 1	n.m.	n.m.	n.m.
1 : 1	n.m.	n.m.	n.m.

Da die Versuche mit dem Marshtrichter nur im Fall der Mischungen mit CEM I 42,5 R-HS ohne Schaum zu Ergebnissen führten, wurde der Auslaufbecher gemäß DIN EN ISO 2431 [A7] mit einem Füllvolumen von 100 cm³ verwendet (Tabelle 20). Die gewählte Durchflußöffnung betrug 8 mm, da bei kleineren Düsenöffnungen ebenfalls keine Messung möglich war.

Tabelle 20: Auslaufzeiten aus dem DIN-Auslaufbecher ($\varnothing = 8$ mm)

BML : SM-Verhältnis	Auslaufzeit in s nach einer Standzeit ab Mischbeginn von			
	4 min	15 min	30 min	60 min
CEM I 42,5 R-HS				
ohne SM	4	5	5	8
ohne SM mit ST	8	9	9	13
2 : 1	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
1 : 1	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
HAZ	4 min	15 min	30 min	60 min
ohne SM	5	7	8	10
ohne SM mit ST	13	14	n.m.	n.m.
2 : 1	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
1 : 1	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.

n.m. ... nicht meßbar

Durch den Stabilisierer steift der Bindemittelleim leicht an, wodurch die Fließgrenze und die Zähigkeit ansteigen und der Bindemittelleim durch den Marshtrichter nicht mehr und durch den Auslaufbecher langsamer ausläuft. Das Fließverhalten der Bindemittelleime mit Schaum konnte weder mit dem Marshtrichter noch mit dem Auslaufbecher erfaßt werden. Hierbei liefern nur die Messungen mit dem Viscomat verwertbare Ergebnisse.

Aus den rheologischen Untersuchungen ergeben sich folgende praktische Konsequenzen für die Injizierbarkeit von Schaummörteln: Bei der Verarbeitung von Schaummörteln muß zum Überwinden der Fließgrenze Druck aufgebracht werden. Das Eigengewicht des Schaummörtels reicht bei den geringen Durchmessern der Schläuche und Packer zum Fließen nicht aus, weshalb geeignete Fördersysteme (Pumpen) eingesetzt werden müssen. Dadurch wird jedoch auch verhindert, daß der Injektionsmörtel, nach dem er ins Mauerwerksinnere gepumpt wurde, wegfließt (z.B. in den Baugrund) und nicht die gewünschten Fehlstellen erreicht. Letzteres wird z.T. bei Kunstharzinjektionen beobachtet.

Ab einem bestimmten Schaumanteil ist der Schaummörtel aufgrund seiner reduzierten Viskosität jedoch leichter pumpbar als die herkömmliche Zementsuspension, was auf den „Kugellagereffekt“ durch die Schaumporen zurückgeführt wird. Dadurch sind beim Injizieren nur geringe Drücke erforderlich (Niederdruckverfahren), um die gewünschten Hohlräume etc. zu verfüllen.

4.5.7 Sedimentationsverhalten

Das Sedimentationsverhalten der Zementsuspensionen (W/B = 0,5) bzw. Schaummörtel wurde in einem 100 ml-Meßzylinder (Skaleneinteilung 0,5 ml) beobachtet (Tabelle 21). Die Prüfung gilt als bestanden, wenn innerhalb von 90 Minuten nach Mischungsherstellung keine Phasentrennung zwischen flüssiger und fester Phase optisch wahrnehmbar ist. Die Prüfung wurde von allen Schaummörteln (mit Stabilisierer) bestanden. Bei beiden Bindemittelsuspensionen mit Stabilisierer bildete sich nach einer Standzeit von ca. 30 min. eine dünne „Haut“, die sich nach ca. 90 Minuten von der Oberfläche ablöste. Eine direkte Phasentrennung zwischen flüssiger und fester Phase wurde jedoch nicht festgestellt, weshalb die Prüfung als bestanden zu bewerten ist. Von den Bindemittelsuspensionen ohne Stabilisierer wurde die Prüfung nicht bestanden.

Tabelle 21: Sedimentationsverhalten der Suspensionen mit CEM I 42,5 R-HS und HAZ

BML : SM-Verhältnis	Abgesonderte Wassermenge in ml nach	
	30 min	90 min
CEM I 32,5 R-HS		
ohne SM	1	1,5
ohne SM mit ST	-	-
2 : 1	-	-
1 : 1	-	-
HAZ		
ohne SM	1	2
ohne SM mit ST	-	-
2 : 1	-	-
1 : 1	-	-

4.5.8 Porengrößenverteilung und Einfluß des Pumpvorganges auf die Frischmörteleigenschaften bei verschiedenen Schaumbildnern

Während alle bisher beschriebenen Frischmörteleigenschaften vor dem Pumpvorgang erfaßt wurden, werden bei den folgenden Untersuchungen die Frischmörteleigenschaften von Schaummörteln auf der Basis von CEM I 42,5 R-HS **vor** und **nach** dem Pumpvorgang beschrieben. Zur Erfassung des Einflusses der Art des Schaumbildners auf die Frischmörteleigenschaften wurden zwei Schaumbildner verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Stabilisierern bei konstantem Bindemittelleim- Schaum-Verhältnis getestet. Die wichtigsten Eigenschaften der Schaumbildner SB 2 und SB 285 sowie der Stabilisierer ST 2 und ST 61 sind in den Tabellen 9 und 10 zusammengefaßt (siehe 4.3.1.1 und 4.3.1.2). Tabelle 22 zeigt die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen vor und nach dem Pumpvorgang. Das Bindemittelleim-Schaum-Verhältnis betrug 3 : 1, der W/B-Wert 0,5.

Tabelle 22: Frischmörteluntersuchungen an Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS vor (vP) und nach dem Pumpvorgang (nP)

Stabilisierer	Schaumbildner	$\rho_{f,vP}$ (kg/dm ³)	$\rho_{f,nP}$ (kg/dm ³)	LP (Vol%) vP *)	LP (Vol%) nP *)	a (cm) vP	a (cm) nP
ST 2	SB 2	1,34	1,60	25	13	24	21
ST 61	SB 285	1,33	1,61	30	14	23	19,5

*) gemessen mit dem Luftporenmeßgerät gemäß DIN 18555 Teil 2 [A14] (Druckausgleichsverfahren)

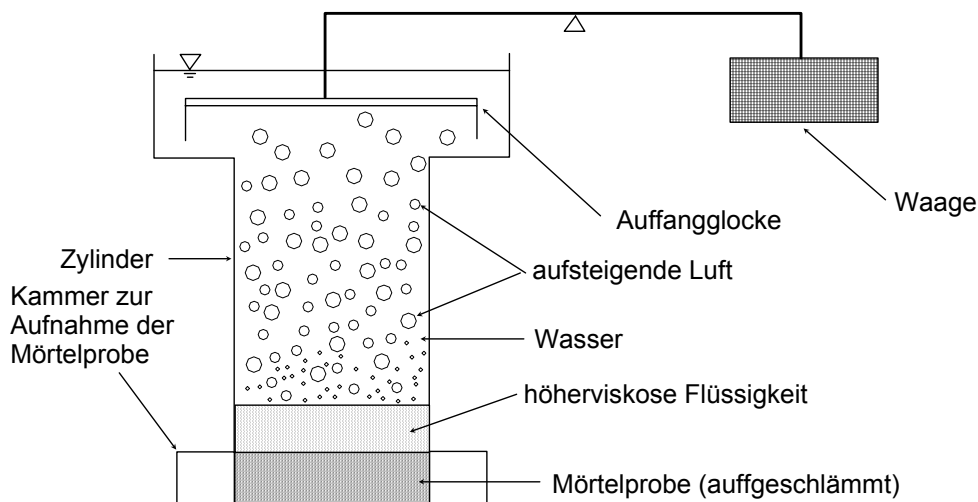
Die Ausbreitmaße und Luftporengehalte nehmen durch den Pumpvorgang ab und die Frischmörtelrohdsichten zu, da ein Teil der Schauporen zerstört wird. Welche Porengrößen davon insbesondere betroffen sind, soll anhand der Untersuchung der Porengrößenverteilung vor und nach dem Pumpen ermittelt werden. Anhand der Frischmörteleigenschaften Rohdichte und Ausbreitmaß wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Schaumbildnern mit zugehörigen Stabilisierern erfaßt. Der Luftporengehalt der Mischung mit SB 285 und ST 61 ist größer als der der Mischung mit SB 2 und ST 2, aber bei erstgenannter Mischung werden mehr Poren durch den Pumpvorgang zerstört.

Die Porengrößenverteilung des Schaummörtels im frischen Zustand wurde mit dem Luftporenmeßgerät (air void analyzer) der Fa. Dansk Beton Teknik A/S (Hellerup, Dänemark) gemessen (Bild 36). Bild 37 zeigt eine schematische Darstellung des DBT-Gerätes.

Bild 36: Luftporenmeßgerät der Fa. Dansk Beton Teknik A/S



Bild 37: Schematische Darstellung des DBT-Gerätes nach [51]



Aus dem Frischmörtel oder -beton wird mit einer speziellen Entnahmeeinrichtung eine Mörtelprobe in eine Spritze gefüllt (Größtkorn maximal 6 mm, Mörtelvolumen = 20 cm³). Diese Probe wird mit der Spritze in die Kammer im unteren Teil des Meßgerätes eingebracht. Über dieser Kammer befindet sich ein Zylinder, der im unteren Bereich mit einer glyzerinartigen zähen Spezialflüssigkeit und im oberen Bereich mit Wasser gefüllt ist. Nach dem Aufrühren der Mörtelprobe mit einem eingebauten Magnetrührer wird die Luft frei gesetzt, steigt als Luftblasen bis zu der Glasglocke am oberen Ende des Zylinders auf und wird dort gesammelt. Durch eine kontinuierliche Bestimmung des Auftriebs, den die Luftbläschen auf die Glocke ausüben, kann der Luftgehalt zu jedem Zeitpunkt des Versuches angegeben werden.

Grundlage des Meßverfahrens ist, daß die Luftblasen aus den größeren Luftporen wesentlich schneller aufsteigen als die kleinen. In Vorversuchen wurden die Luftporenverteilungen in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt. Daraus können in Kombination mit dem kontinuierlich gemessenen Luftgehalt die Porengrößenverteilung, der Gesamtluftgehalt und der Abstands faktor bestimmt werden. Die Berechnungsgrundlagen sind in den Unterlagen des Herstellers zusammengestellt und sollen hier nicht näher erläutert werden.

Die entnommene Mörtelprobe wird in die Meßvorrichtung gespritzt, wobei der Meßvorgang mit dem Einschalten des Magnetrührers (Rührzeit 30 s) beginnt. Der Meßvorgang wird beendet, wenn die Zunahme des Auftriebes je Minute unter den Wert von 0,01 g sinkt oder eine Gesamtmeßzeit von maximal 25 Minuten erreicht ist.

Ausgelegt ist das DBT-Gerät für Mörtelproben mit Luftgehalten zwischen 3 und 10 Vol%. Bei sehr niedrigen Luftgehalten ist der meßbare Auftrieb zu gering, bei sehr großen Luftgehalten ist u.U. mit Turbulenzen in der Flüssigkeit zu rechnen, die die Ergebnisse verfälschen könnten [51]. Letzteres wurde bei den durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt.

Tabelle 23 zeigt die Luftporengehalte vor und nach dem Pumpen im Vergleich zu den Werten, die mit dem Gerät gemäß DIN 18555 Teil 2 (Druckausgleichsverfahren) gemessen wurden.

Tabelle 23: Luftporengehalte in Vol% bestimmt mit dem Luftporengehaltsprüfer gemäß DIN 18555 (Spalten 3 + 4) und dem DBT-Luftporenmeßgerät (Spalten 5 + 6)

Stabilisierer	Schaumbildner	LP (Vol%) vP	LP (Vol%) nP	LP (Vol%) vP	LP (Vol%) nP
ST 2	SB 2	25	13	26,3	13,2
ST 61	SB 285	30	14	33,6	13,8

Bild 38 zeigt die Porengrößenverteilung des frischen Schaummörtels aus CEM I 42,5 R-HS mit SB 2 und ST 2. Der Hauptanteil der Poren sowohl vor als auch nach dem Pumpen liegt zwischen 0,2 und 1 mm. Die maximale Porengröße beträgt 2 mm. Der Porenanteil zwischen 1 und 2 mm ist jedoch gering. Größere Einzelblasen platzen bereits direkt nach der Schaumherstellung mit dem Schaumgerät oder werden beim Untermischen des Schaumes unter den Bindemittelleim zerstört. Bild 39 veranschaulicht die Reduzierung des Anteiles der Luftporen in den einzelnen Porengrößenklassen durch den Pumpvorgang (Gl. 1).

$$(1) \quad \text{Reduzierung} = 1 - \frac{LP_{nP < 0,125}}{LP_{vP < 0,125}} \cdot 100 \%$$

Der Anteil zerstörter Luftporen nimmt mit der Porengröße zu, d.h. die größeren Poren sind instabiler. Im Porengrößenbereich < 0,125 mm nimmt der Anteil an zerstörten Poren scheinbar wieder zu. Aufgrund des relativ geringen Anteiles an Poren in dieser Größe und der Verringerung der Meßgenauigkeit des Gerätes mit abnehmender Luftporengröße kann es hierbei u.U. zu Verfälschungen kommen. In Bild 40 wurden deshalb die Anteile im Porengrößenbereich < 0,2 mm zusammengefaßt und wiederum die Reduzierung des Porenanteils (Gl. 1) durch die Druckeinwirkung während des Pumpvorganges dargestellt, wodurch die Abhängigkeit des Anteiles zerstörter Luftporen von der Porengröße deutlicher veranschaulicht wird.

Bild 38: Porengrößenverteilung des CEM I 42,5R-HS-Schaummörtels mit SB 2 und ST 2

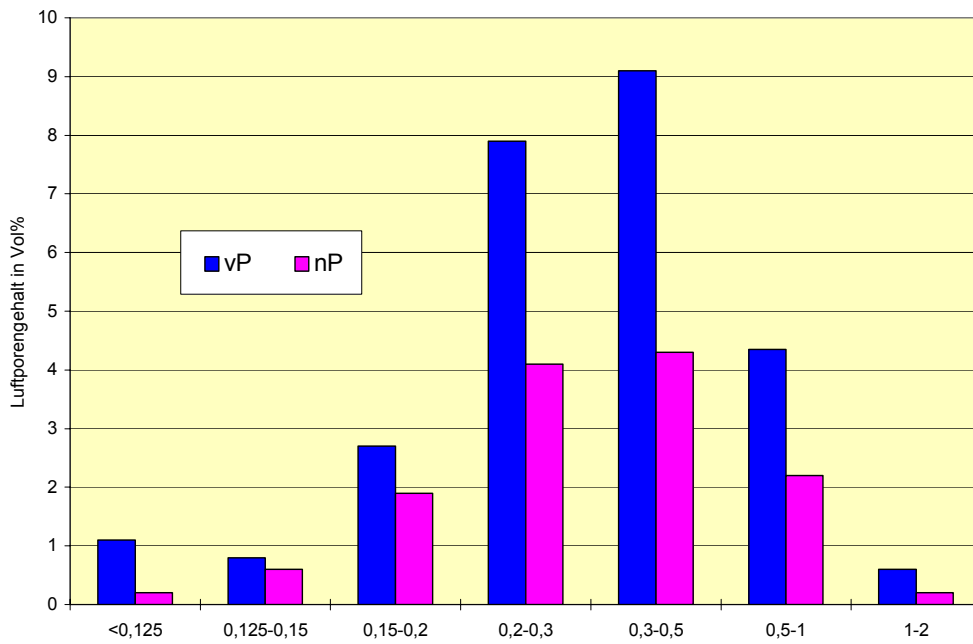


Bild 39: Reduzierung des Anteiles der Luftporen in den einzelnen Porengrößenklassen durch den Pumpvorgang (SB 2 und ST 2)

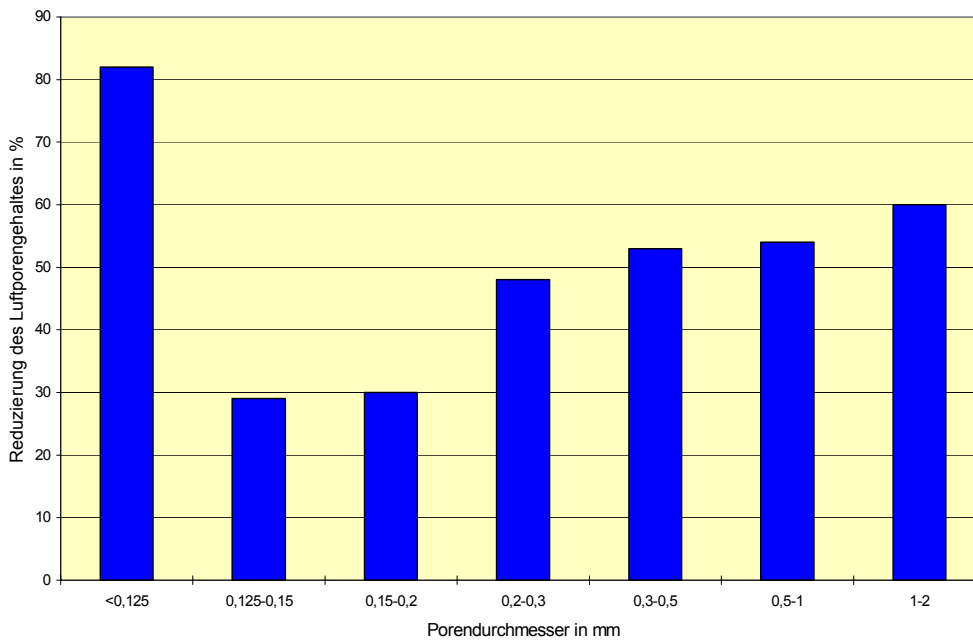


Bild 40: Reduzierung des Anteiles der Luftporen in den Porengrößenklassen 0,2 mm bis 2 mm durch den Pumpvorgang (SB 2 und ST 2)

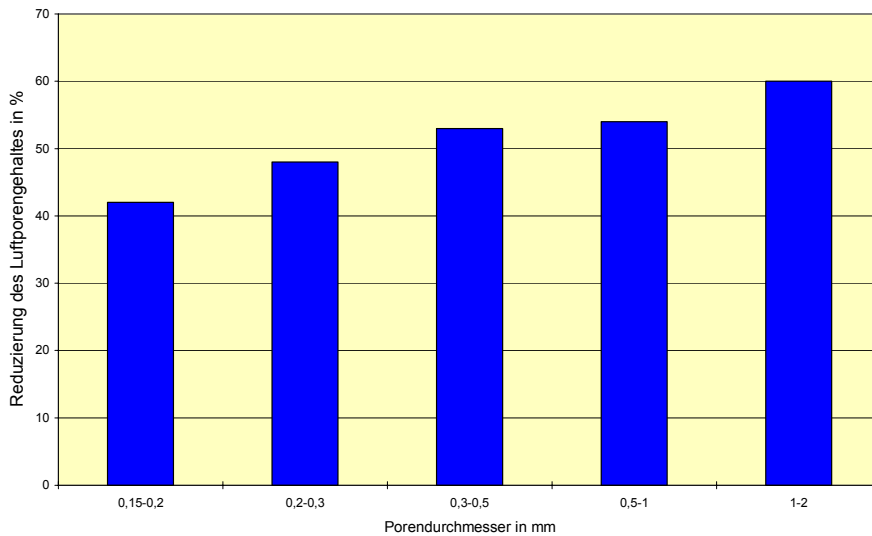
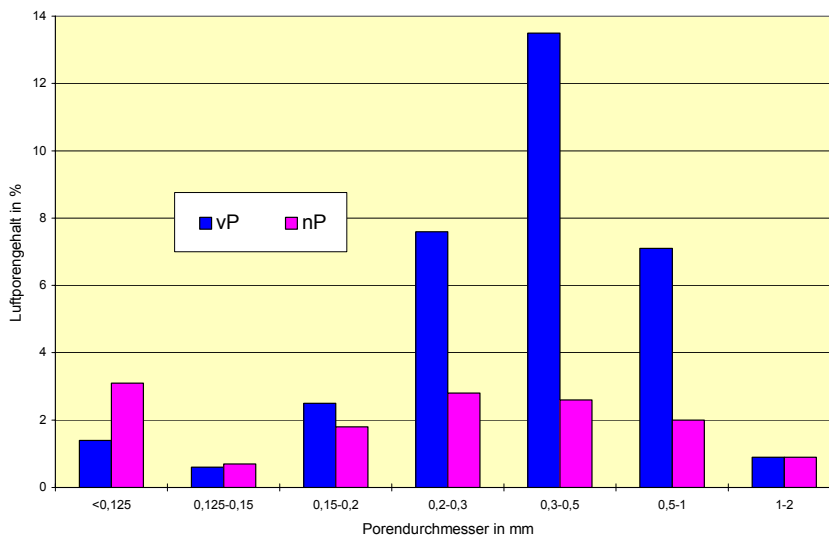


Bild 41 zeigt die Porengrößenverteilung des Schaummörtels aus CEM I 42,5 R-HS mit SB 285 und ST 61. Der Hauptanteil der Poren vor dem Pumpen liegt analog zum Schaummörtel mit SB 2 und ST 2 zwischen 0,2 und 1,0 mm. Nach dem Pumpen zeigt der Schaummörtel mit SB 285 und ST 61 kein ausgeprägtes Maximum.

Bild 41: Porengrößenverteilung des CEM I 42,5 R-HS-Schaummörtels mit SB 285 und ST 61



Im Porenbereich > 1 mm tritt durch den Pumpvorgang keine meßbare Veränderung auf. Die Porenanteile im Bereich zwischen 0,2 und 1 mm werden um ca. 70 % reduziert. Der Anteil an Poren $< 0,125$ mm nimmt nach dem Pumpen zu. Das ist nur möglich, wenn die Oberflächenspannung im flüssigen System wieder ansteigt, so daß aus größeren Einzelporen mehrere kleine Luftporen entstehen.

4.6 Festmörteleigenschaften

4.6.1 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper und Prüfverfahren

Die Herstellung der Mörtelprismen (Abmessung $4\cdot4\cdot16\text{ cm}^3$) und Würfel (Kantenlänge 10 cm und 15 cm) für die Festmörteluntersuchungen erfolgte in Anlehnung an DIN 18555, Teil 3 [A14].

Die Bestimmung der Druckfestigkeit nach Erhärungszeiten von 28 und z.T. 90 Tagen erfolgte an 10er und 15er Würfeln und Prismen der Abmessung $4\cdot4\cdot16\text{ cm}^3$ gemäß DIN EN 196 Teil 1 [A8].

Der dynamische E-Modul wurde mittels Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung (Grindosonic-Verfahren) bestimmt, wobei nur die Frequenz der Longitudinalwelle ausgewertet wurde. Zusätzlich erfolgte die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen auf der Basis von Ultraschallimpulsen in Anlehnung an ISO 8047. Die Biegezugfestigkeit wurde gemäß DIN EN 196 Teil 1 an Prismen der Abmessung $4\cdot4\cdot16\text{ cm}^3$ bestimmt.

Die Prüfung der Wasseraufnahme und der kapillaren Wasseraufnahme erfolgte in Anlehnung an DIN 52103 Verfahren A [A32] bzw. DIN 52617 [A30] anhand von Prüfkörpern der Abmessung $4\cdot4\cdot4\text{ cm}^3$ nach Trocknung der Prüfkörper bei 40 °C bis zur Massekonstanz.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ -Wert) wurde gemäß DIN 52615 [A34] nach dem wet-cup-Verfahren an Scheiben mit 10 cm Durchmesser und 2 cm Dicke gemessen.

Die Bestimmung der Festmörtelrohichte erfolgte gemäß DIN 18555 Teil 3, die der Gesamtporosität gemäß DIN 52 102 [A33] nach Trocknung der Prüfkörper bei 40 °C bis zur Massekonstanz.

Die hygri-schen Dehnungen wurden gemäß DIN 52 450 [A3] erfaßt bei Klimaten von 10 °C und 85 % r.F., 20 °C und 65 % r.F. (Schwinden) und bei 10 °C unter Wasser (Quellen).

Die Prüfkörper lagerten 7 Tage bei 20 °C und 95 % r.F. und anschließend bei 20 °C und 65 % r.F. gemäß DIN 18555 (außer Schwinden/Quellen) und zusätzlich bei bauwerksrelevantem Klima von 10 °C und 85 % r.F.

4.6.2 Gefüge und Porengrößenverteilung

Wie bereits unter 4.3.1.1 beschrieben, bleiben nach dem Erstarren und Erhärten des Bindemittels kugelige Luftporen zurück, die von der festigkeitsbildenden Bindemittelmatrix umgeben werden. Bild 42 zeigt das Gefüge eines Schaummörtels aus HAZ in 18facher Vergrößerung. Die Dicke der Bindemittelstege zwischen den Luftporen hängt primär vom Schaumanteil ab, d.h. mit steigendem Porenanteil nimmt die Dicke der Bindemittelstege ab. Die Porengrößenverteilung, insbesondere der Kapillarporenanteil, innerhalb der Bindemittelmatrix hängt vom Wasser-Bindemittel-Wert ab.

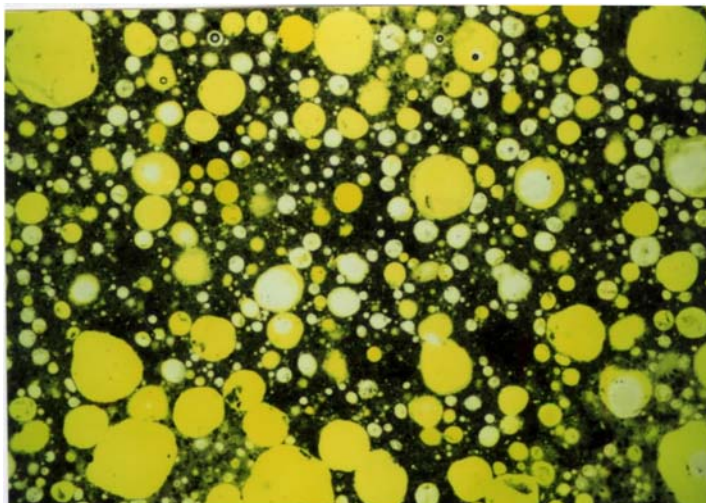
Zur Untersuchung der Porenstruktur, -größe und Porengrößenverteilung wurden zwei unterschiedliche Analyseverfahren angewendet: die Quecksilberhochdruckporosimetrie und die lichtmikroskopische Untersuchung an Bruchflächen. Für die detaillierte Untersuchung der porenumschließenden Bindemittelmatrix wurden die Rasterelektronenmikroskopie und die Elektronenstrahlmikroanalyse herangezogen.

Es wurde weiterhin versucht, die Porengrößenverteilung bildanalytisch zu erfassen. Dazu wurden die Schaummörtelproben mit einem geeigneten fluoreszierenden Harz getränkt und anschließend Dünnschliffe hergestellt. Es zeigte sich jedoch, daß selbst bei Tränkung unter Druck und dem Einsatz verschieden viskoser Tränkungsmedium in keinem Fall alle Schaumporen gefüllt werden konnten (Bild 43). Das traf auch auf Proben zu, bei denen zum Vergleich die Luftporen durch einen Luftporenbildner im Mörtel erzeugt wurden. Aus diesem Grunde wurde zur mikroskopischen Untersuchung an frisch erzeugten Oberflächen übergegangen.

Bild 42: HAZ-Schaummörtelgefüge in 18facher Vergrößerung



Bild 43: Schaummörtelgefüge mit unvollständig getränkten Poren in 30facher Vergrößerung



4.6.2.1 Untersuchung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie

Die Quecksilberhochdruckporosimetrie ist das im Bereich der mineralischen Baustoffe am häufigsten angewandte Meßverfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilung. Bei den folgenden Untersuchungen wurde ein Meßgerät der Fa. micromeritics, Typ Autopore II 9220 eingesetzt.

Der Erfassung der Porenradienverteilung liegt dabei folgendes Meßprinzip zugrunde: Eine nichtbenetzende Flüssigkeit (Quecksilber), deren Randwinkel größer 90 ° ist, dringt unter Aufbringung einer äußeren Kraft in die Poren des festen Mörtels ein (Penetrationsverfahren). Aus dem Kräftegleichgewicht der von außen aufgetragenen Kraft und der durch die Oberflächenspannung bedingten Gegenkraft leitete Washburn folgende Beziehung zwischen dem Porenradius und dem aufgetragenen Druck ab:

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

r	...	Porenradius in µm	p	...	Druck in Mpa
σ	...	Oberflächenspannung in N/m	θ	...	Randwinkel in °

Diese Gleichung beruht auf der Annahme, daß das Porensystem aus zylindrischen Kapillarporen unterschiedlicher Durchmesser aufgebaut ist. Mit Drücken bis zu 412 MPa können zylindrische Poren im Bereich zwischen 3,6 nm und ca. 450 µm erfaßt werden.

Die Messungen mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie erbrachten für die Injektionsmörtel mit Schaum, bei denen der Gehalt an Luftporen, d.h. weitgehend geschlossenen Kugelporen, je nach Schaumanteil bis zu 10mal höher ist als bei herkömmlichen Mörteln und ca. in der gleichen Größenordnung liegt wie der Anteil an zylindrischen, miteinander verbundenen Kapillarporen, keine auswertbaren Ergebnisse. Das ist zum einen damit zu begründen, daß sich der Berechnungsansatz nach Washburn nur auf zylindrische, frei zugängige Poren bezieht. Zum anderen ist bei Vorhandensein der Tensidschicht an den Porenwänden (Dicke im nm-Bereich, siehe Bild 21) mit einem anderen Randwinkel des Quecksilbers bei der Penetration der Poren zu rechnen.

4.6.2.2 Lichtmikroskopische Untersuchung der Porengrößenverteilung

Für die Untersuchung des erhärteten Schaummörtelgefüges im Auflicht wurde zuerst versucht, ausreichend ebene Probekörperoberflächen durch Sägen zu erzielen. Das führte jedoch dazu, daß sich die angeschnittenen Luftporen mit Sägemehl zusetzten, welches sich durch Ausblasen mit Druckluft bzw. Abbürsten nicht beseitigen ließ.

Deshalb wurden die notwendigen Probekörperoberflächen durch gezieltes Spalten mittels Spaltzugmaschine erzeugt. Die bei der mikroskopischen Abbildung erreichte Tiefenschärfe war zwar nicht so hoch wie bei den gesägten Proben, für die allgemeine Gefügebeschreibung (siehe Bild 42) sowie das Ausmessen der Porendurchmesser jedoch ausreichend. Die unter dem Mikroskop abgebildeten Probekörperausschnitte wurden fotografiert und jeweils 10 Ausschnitte einer Probe der gleichen Vergrößerung zu einem Gesamtbild zusammengestellt, an welchem die Porendurchmesser unter Berücksichtigung der Vergrößerung in gleichmäßigem Raster mit einem Stahllineal ausgemessen wurden. Zur Ermittlung der Porengrößenverteilung wurden die Porendurchmesser in Häufigkeitsklassen eingeteilt. Die Porengrößen für die Klasseneinteilung ergaben sich aus der Vergrößerung und der kleinsten am Stahllineal gesichert mit dem Auge erfaßbaren Einheit von 0,5 mm.

Es wurden Schaummörtelproben aus CEM I 42,5 R-HS (28 d bei 10/85 erhärtet) untersucht, die mit zwei unterschiedlichen Schaumbildnern und Stabilisierern (SB 2/ST 2 und SB 285/ST 61) bei konstantem Wasser-Bindemittel-Wert von 0,5 und Bindemittelleim-Schaum-Verhältnis von 3:1 hergestellt worden sind.

Anhand der lichtmikroskopischen Abbildung wird deutlich, daß die kugeligen Luftporen überwiegend als geschlossene Einzelporen vorliegen, die nur über das Kapillarporensystem innerhalb der Bindemittelmatrix für Flüssigkeiten zugänglich sind. Zusammenlagerungen von Luftporen, die über einen Teil der Porenwandung verbunden und untereinander frei zugänglich sind, sind eher selten (siehe dazu auch Bild 51).

Die Luftporengröße sowie die Porengrößenverteilung werden primär durch die Art des Schaumbildners bestimmt. Die Bindemittelart der Schaummörtel beeinflußt stärker den Gesamtluftporengehalt als die Porengrößenverteilung.

Die mikroskopische Untersuchung der Luftporen am Festmörtel ergab für den CEM I 42,5 R-HS-Schaummörtel mit dem Schaumbildner SB 2 einen Hauptporenanteil im Bereich zwischen 0,1 mm und 0,3 mm (Bild 44). Bei dem gleichen Schaummörtel mit Schaumbildner SB 285 zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Proben, die vor und nach der Pumpe entnommen wurden (Bild 45).

Vor dem Pumpen liegt der Hauptporenanteil analog zum Schaummörtel mit SB 2 zwischen 0,1 mm und 0,3 mm. Das Durchlaufen der Pumpe verschiebt das Porenmaximum beim SB 285 zu kleineren Porendurchmessern zwischen 0,025 mm und 0,1 mm. Dieser Effekt, d.h. die Zunahme kleinerer Poren durch den Pumpvorgang beim SB 285 wurde bereits bei der Untersuchung der Porengrößenverteilung im frischen Zustand festgestellt (siehe 41).

Bild 44: Porengrößenverteilung des CEM I 42,5 R-HS-Schaummörtels mit SB 285 und SB 2 (nach dem Pumpvorgang); Porenanzahl/cm² in Abhängigkeit vom Porendurchmesser

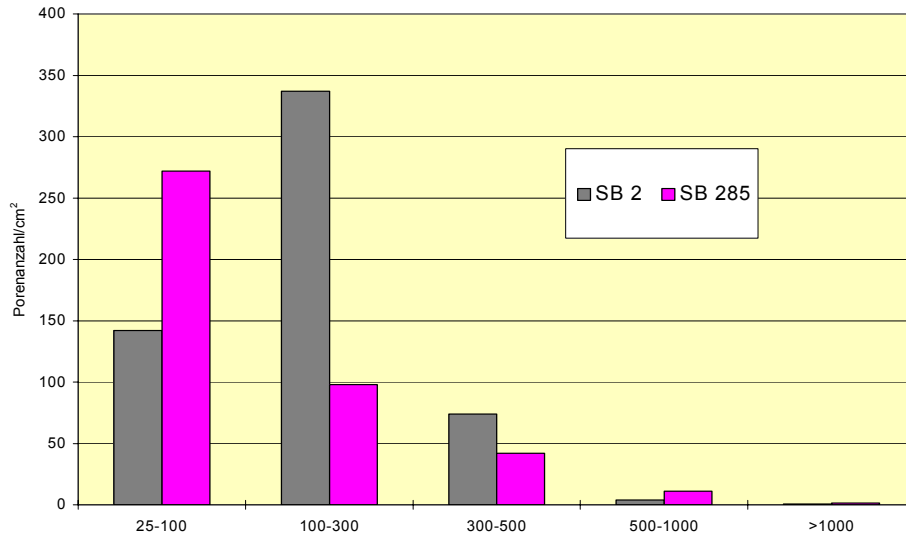
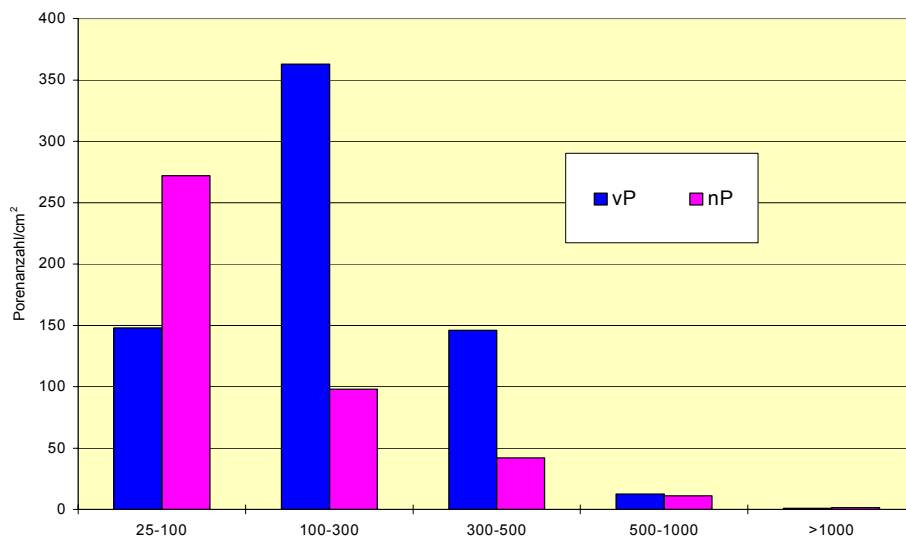


Bild 45: Porengrößenverteilung des CEM I 42,5 R-HS-Schaummörtels mit SB 285 (vor und nach dem Pumpvorgang); Porenanzahl/cm² in Abhängigkeit vom Porendurchmesser



4.6.2.3 REM-Gefügeuntersuchungen

Für die rasterelektronenmikroskopischen Gefügeuntersuchungen wurden Prismen aus HAZ und CEM 42,5 R-HS ohne und mit Schaum hergestellt (siehe auch 4.6.1), die bis zur Präparation bei bauwerksrelevantem Klima von 10/85 lagerten. Aus den Prismen wurden etwa kirschgroße Proben herausgebrochen und auf den Objektträger geklebt. Für die Untersuchungen am konventionellen Rasterelektronenmikroskop (Fa. Hitachi S-2700 LB) wurden die Proben mit Kohlenstoff bedampft. Die Untersuchungen am Philips Environmental Scanning Electron Microscope (XL-30 ESEM-FEG) mit integriertem Energiedispersiven Röntgenmikroanalyse-System konnten ohne vorherige Trocknung und Probenpräparation, artefaktfrei in bis zu 16000facher Vergrößerung erfolgen. In [78] werden die Rasterelektronenmikroskoptypen ausführlich beschrieben und verglichen u.a. hinsichtlich der Präparation und Interpretationsmöglichkeiten.

Bild 46 zeigt in 100facher Vergrößerung die dichte Zementsteinstruktur des CEM I 42,5 R-HS nach 28tägiger Hydratation bei 10/85, die von wenigen Verdichtungsporen durchzogen ist. Bild 47 zeigt die gleiche Zementsteinmatrix mit einem Luftporengehalt von ca. 50 Vol% in 100facher Vergrößerung. Tabelle 24 enthält die zugehörigen integralen Elemente- bzw. Oxidverteilungen. Bild 48 veranschaulicht einen Ausschnitt der Zementsteinmatrix des Schaummörtels in 8000facher Vergrößerung. Einzelne Ettringitnadeln wachsen aus einem „Rasen“ von C-S-H-Phasen (Kristallgröße im nm-Bereich).

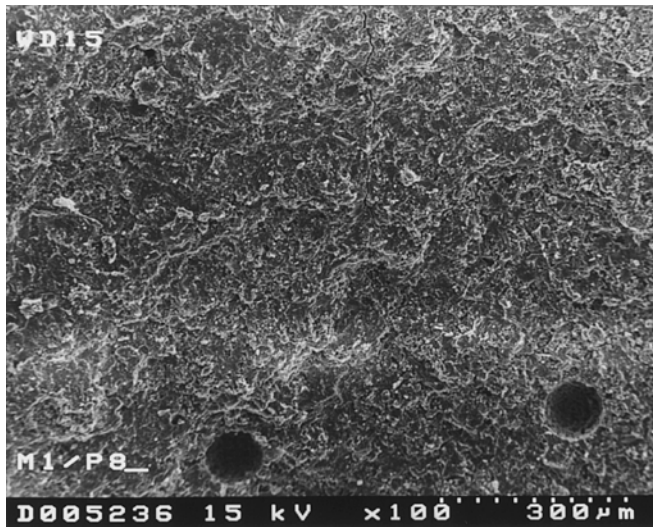
Die überwiegend aus C-S-H-Phasen bestehende CEM I 42,5 R-HS-Matrix der Proben mit und ohne zusätzlich eingeführte Luftporen ist vergleichbar. D.h. auch anhand der REM-, ESEM- und ESMA-Untersuchungen gibt es keinen Hinweis darauf, daß der Schaumbildner (Tensid), der nach der Bindemittelerhärtung als Relikt an der Porenwandung verbleibt (siehe Bild 21) und permeabel ist, die Hydratphasenbildung sowie die -zusammensetzung beeinflusst (Vgl. dazu auch Spalten 2 bis 4 in Tabelle 24). Bild 49 zeigt einen Ausschnitt der Porenwandung in 600facher Vergrößerung, an der Portlandit (Bildmitte) und ein Rasen aus C-S-H-Phasen und Ettringitnadeln in Richtung des Poreninneren kristallisiert sind.

Tabelle 24: Aus der Elementeverteilung berechnete, GV-freie Oxidzusammensetzung der

Hydratationsprodukte des CEM I 42,5 R-HS und HAZ nach 28 d bei 10/85

	CEM I BMpur	CEM I -SM BML:SM=2:1	CEM I -SM BML:SM=1:1	HÜS im HAZ	HAZ-SM BML:SM=2:1	HAZ -SM BML:SM=1:1
Na ₂ O	0,03	0,13	0,88	0,45	0	0
MgO	0,33	0,66	0,57	7,69	4,55	2,24
Al ₂ O ₃	2,26	2,42	2,57	11,7	6,49	6,72
SiO ₂	15,76	21,7	18,97	37,14	27,5	26,89
SO ₃	2,76	3,28	2,75	5,57	15,59	19,54
K ₂ O	1,14	0,37	0,62	0,73	0,54	0,58
CaO	74,88	68,05	68,34	36,72	44,43	44,03
TiO ₂	0,12	0	0,41	0	0,87	0
Fe ₂ O ₃	2,71	3,38	4,88	0	0,03	0

Bild 46: CEM I 42,5 R-HS ohne Schaum in 100facher Vergrößerung (high-Vac, C-



Bed.)

Bild 47: CEM I 42,5 R-HS mit Schaum in 100facher Vergrößerung (high-Vac, C-Bed.)

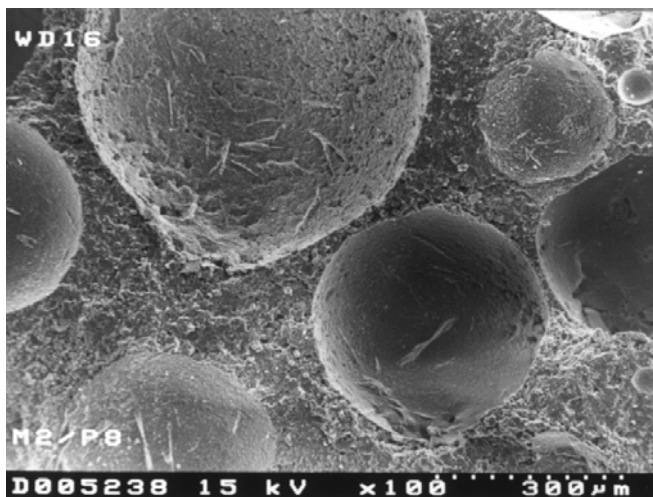


Bild 48: Matrix des CEM I 42,5 R-HS Schaummörtels in 8000facher Vergrößerung (WET)



Bild 49: Ausschnitt der Porenwand (CEM I 42,5 R-HS Schaummörtel)
in 600facher Vergrößerung (high-Vac, C-Bed.)

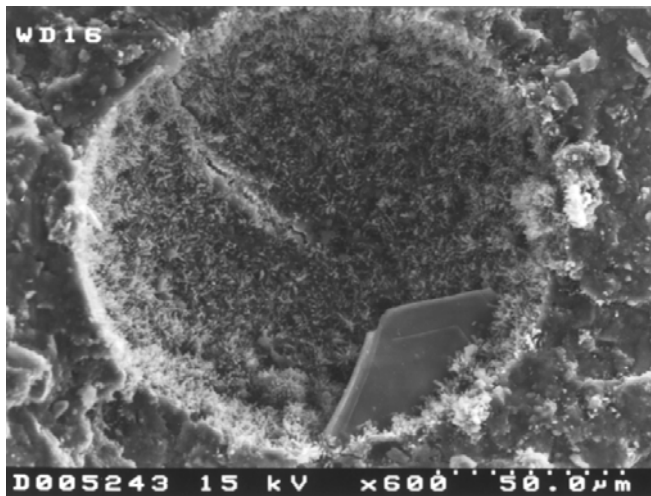


Bild 50: HAZ ohne Schaum in 100facher Vergrößerung (high-Vac, C-Bed.)

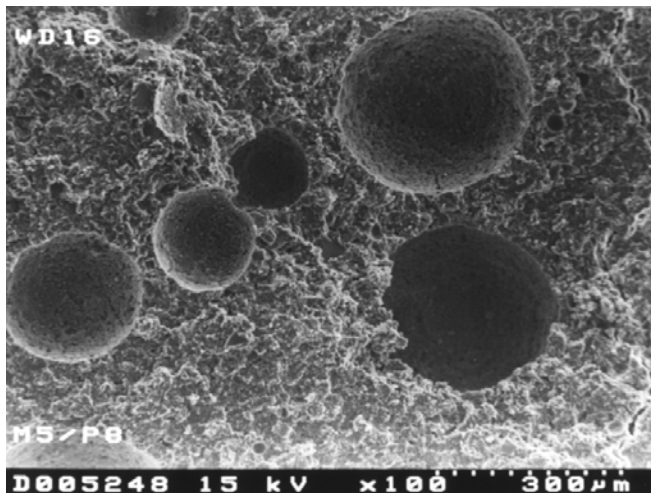


Bild 51: HAZ mit Schaum in 100facher Vergrößerung (high-Vac, C-Bed.)

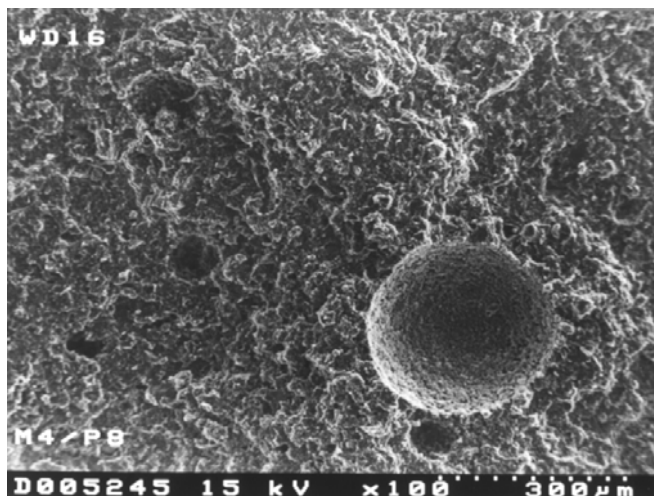


Bild 52: HAZ-Gefüge (ohne Schaum) mit Faserbündeln aus CSH-Phasen und Ettringit in 16000facher Vergrößerung (WET)

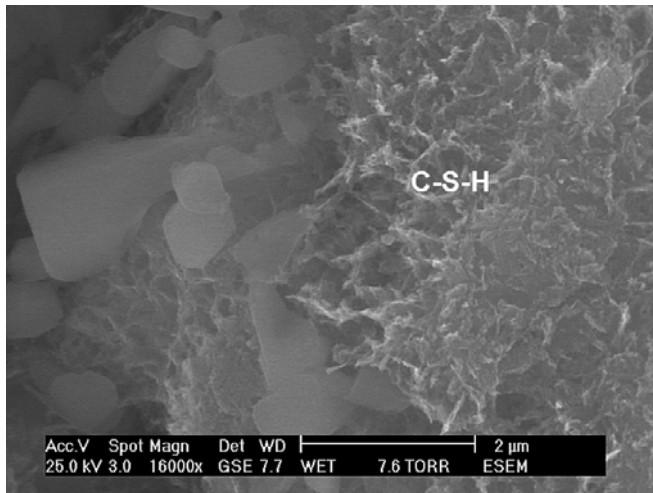


Bild 53: HAZ-Gefüge (mit Schaum) mit Faserbündeln aus CSH-Phasen und Ettringit in 16000facher Vergrößerung (WET)



Bild 54: Hüttensandpartikel im HAZ-Gefüge mit „Hydratationssaum“
in 1500facher Vergrößerung (high-Vac, C-Bed.)

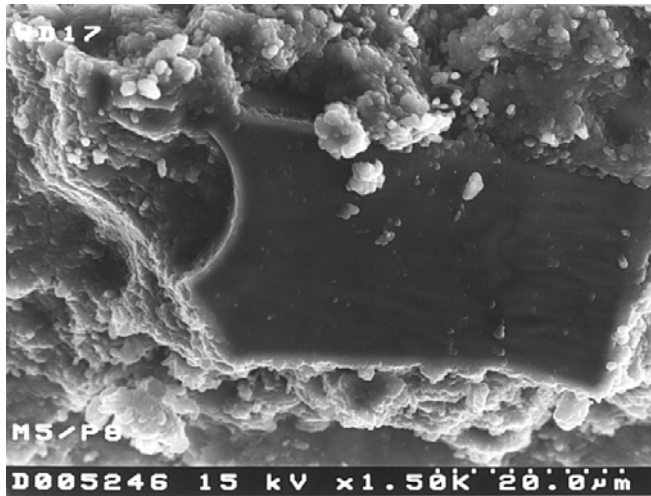


Bild 55: Hüttensandpartikel im HAZ-Gefüge mit Hydratationsprodukten
in 1000facher Vergrößerung (WET)

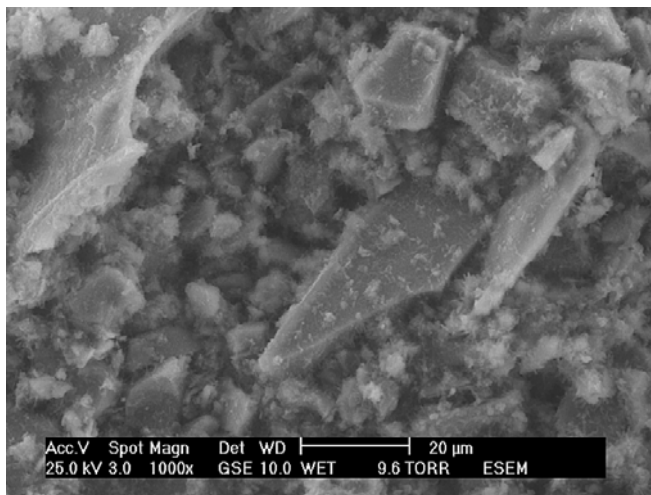


Bild 56: Hüttensandpartikel (Detail aus Bild 55)
in 4000facher Vergrößerung (WET)

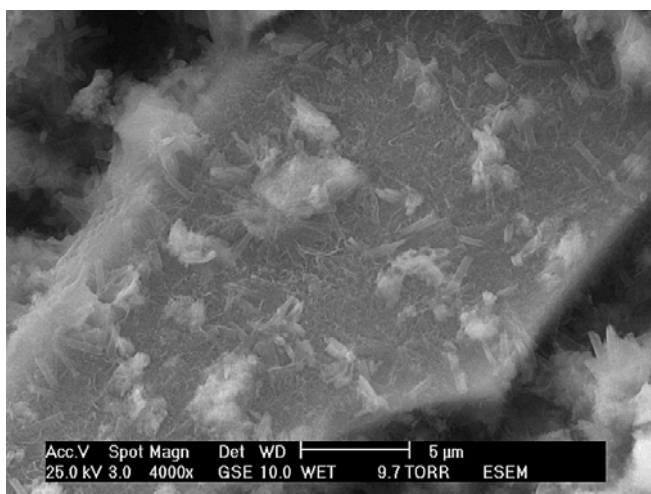


Bild 50 veranschaulicht das Gefüge des 28 Tage bei 10/85 hydratisierten HAZ in 100facher Vergrößerung mit vereinzelt Verdichtungsporen. Das Gefüge eines HAZ-Schaummörtels in gleicher Vergrößerung ist in Bild 51 dargestellt. Die Bilder 52 und 53 zeigen jeweils eine ESEM-Aufnahme der Matrix des HAZ ohne (Bild 52) und mit Schaum (Bild 53). Neben den dünnfaserigen C-S-H-Phasen sind deutlich Ettringitnadeln mit hexagonalem Querschnitt zu sehen. Auch im Matrixbereich des HAZ sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Mörteln ohne und mit Schaum feststellbar.

In der Mitte des Bildes 54 wurde ein ca. 30 µm großer Hüttensandpartikel im erhärteten HAZ mittels konventioneller REM (high-Vac, C-Bedampfung) abgebildet (zugehöriges EDS, siehe Spalte 5 in Tabelle 24), der von Hydratationsprodukten umsäumt wird. Vereinzelt sind auch noch Calciumsulfatpartikel nachweisbar. Bild 55 zeigt ein vergleichbares Detail, welches am ESEM ohne Hochvakuum und vorherige Kohlenstoffbedampfung aufgenommen wurde.

Bild 56 veranschaulicht ein Detail des Hüttensandpartikels in 4000facher Vergrößerung. Während mittels konventioneller REM (Bild 54) u.a. aufgrund der ca. 30 nm dicken Kohlenstoffschicht die Reaktionsschicht an der Oberfläche des Hüttensandpartikels nur verschwommen erscheint und keine Differenzierung zuläßt, konnten bei der Untersuchung im ESEM die Hydratationsprodukte Ettringit und C-S-H-Phasen auf den Hüttensandoberflächen deutlich abgebildet werden.

4.6.3 Festmörtelrohichte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

4.6.3.1 Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer und den Lagerungsbedingungen

Die Tabellen 25 und 26 zeigen die ausgleichsfeuchte Festmörtelrohichte und die Trockenrohichte (40 °C) der Bindemittel HAZ und CEM I 42,5 R-HS (W/B-Wert = 0,5) ohne und mit Schaum (BML : SM = 2 : 1) nach 7, 28 und 90tägiger Erhärtung bei 20 °C und 95% (7 d) bzw. anschließend 65 % r.F. und bei 10 °C und 85 % r.F, gemessen an Würfeln mit einer Kantenlänge von 10 cm.

Tabelle 25: Ausgleichsfeuchte Festmörtelrohichte des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum

Prüfalter in d	Rohdichte in kg/dm ³ , ausgleichsfeucht							
	HAZ-BM _{pur}		HAZ-SM		CEM I 42,5 R-HS-BM _{pur}		CEM I 42,5 R-HS-SM	
	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85
7	1,74	1,74	0,94	1,06	1,81	1,81	1,05	1,13
28	1,63	1,74	0,93	1,06	1,74	1,81	0,99	1,13
90	1,58	1,74	0,85	1,05	1,72	1,81	0,99	1,14

Tabelle 26: Rohdichte nach Trocknung bei 40 °C des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum

	Rohdichte in kg/dm ³ , 40 °C getrocknet							
Prüfalter in d	HAZ-BM _{pur}		HAZ-SM		CEM I 42,5R-HS-BM _{pur}		CEM I 42,5R-HS-SM	
	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85
7	1,58	1,57	0,84	0,86	1,62	1,62	0,91	0,89
28	1,59	1,61	0,84	0,89	1,63	1,64	0,84	0,85
90	1,55	1,63	0,73	0,77	1,66	1,69	0,80	0,80

Die Druckfestigkeiten und dynamischen E-Moduln der Bindemittel HAZ und CEM I 42,5 R-HS (W/B-Wert = 0,5) ohne und mit Schaum (BML : SM = 2 : 1) nach 7, 28 und 90 tägiger Erhärtung bei 20 /95/65 und bei 10/85, gemessen an Normprismen, zeigen die Tabellen 27 und 28. Bild 57 dokumentiert die Druckfestigkeit des HAZ und CEM I 42,5 R-HS in Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer. Bild 58 veranschaulicht den Einfluß des Klimas während der Lagerung auf die Druckfestigkeiten des CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum.

Tabelle 27 : Druckfestigkeit des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum

	Druckfestigkeit in N/mm ²							
Prüfalter in d	HAZ-BM _{pur}		HAZ-SM		CEM I 42,5R-HS-BM _{pur}		CEM I 42,5R-HS-SM	
	20/95/65	0/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85
7	17,3	15,1	2,2	1,8	34,5	33,2	8,9	7,8
28	20,8	20,2	5,5	4,8	41,1	36,2	10,3	8,3
90	20,2	21,3	3,5	5,8	45,2	49,5	11,2	12,7

Tabelle 28: E_{dyn}-Modul des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum

	dynamischer E-Modul in N/mm ²							
Prüfalter in d	HAZ-BM _{pur}		HAZ-SM		CEM I 42,5 R- HS-BM _{pur}		CEM I 42,5 R- HS-SM	
	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85
7	10600	9700	3200	3200	14500	13300	4700	4300
28	6700	10800	2100	3600	12800	13500	4400	5300
90	4900	12400	2100	3900	12600	16900	4300	6100

Bild 57: Druckfestigkeit des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum in Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer (Klima 10/85)

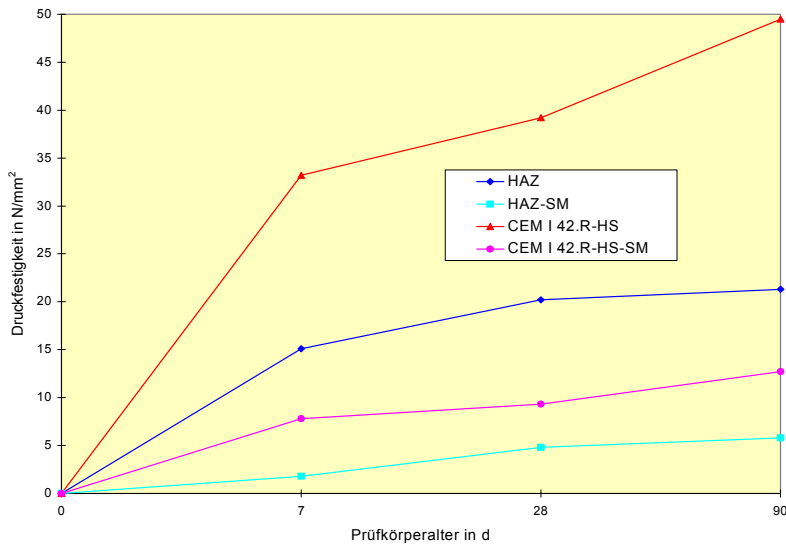
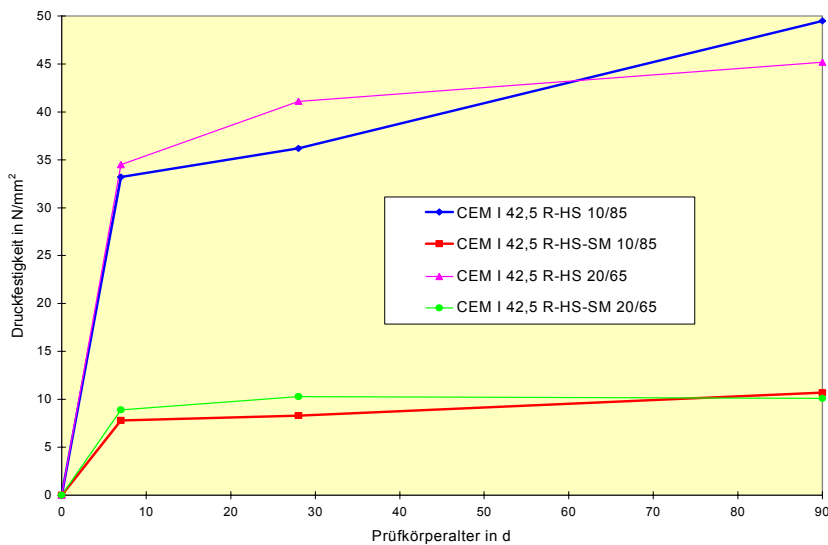


Bild 58: Druckfestigkeit des CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen



Die Druckfestigkeit des erhärteten Purzementes wird durch die unterschiedlichen Temperaturen und Feuchten stärker beeinflusst als die des Schaummörtels, was bei letzteren hauptsächlich auf den reduzierten Bindemittelanteil pro Volumeneinheit zurückgeführt wird. Beim Purzement bewirkt die höhere Temperatur anfänglich bei ausreichender Eigenfeuchte der Probekörper (durch das Anmachwasser) eine schnellere Festigkeitsentwicklung. Bei längerer Hydratationsdauer erreichen die bei 10/85 gelagerten Purzementproben höhere Festigkeiten, d.h. hier wirkt sich die höhere Feuchte wie bei einer guten Nachbehandlung stärker aus als die höhere Temperatur.

4.6.3.2 Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Rohdichte

Bild 59 veranschaulicht die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Trockenrohddichte bei Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS bei konstantem W/B-Wert von 0,5. Dabei handelt es sich um Meßwerte, die anhand einer Vielzahl von Labor- und Baustellenprüfkörpern unter Berücksichtigung der z.T. unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien bestimmt wurden (siehe dazu auch 4.6.3.5). Diese Abhängigkeit sowie die Korrelationen zwischen Frisch-, ausgleichsfeuchter und Trockenrohddichte nach Mielke in [34] dienen bei der Schaummörtelprojektierung für den Praxiseinsatz der Festlegung der Frischrohddichte, die zum Erreichen des vom Statiker vorgegebenen Bereiches für die Druckfestigkeit und den E-Modul erforderlich ist. Die Frischmörtelrohddichte wird über den Schaumanteil eingestellt (siehe 4.5 und Tabelle 16).

Bild 60 dokumentiert die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der ausgleichfeuchten Festmörtelrohddichte bei 10/85 am Beispiel von HAZ-Schaummörteln.

Bild 59: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der **Trockenrohddichte** bei Schaummörteln aus **CEM I 42,5 R-HS** (Lagerung bei 10/85)

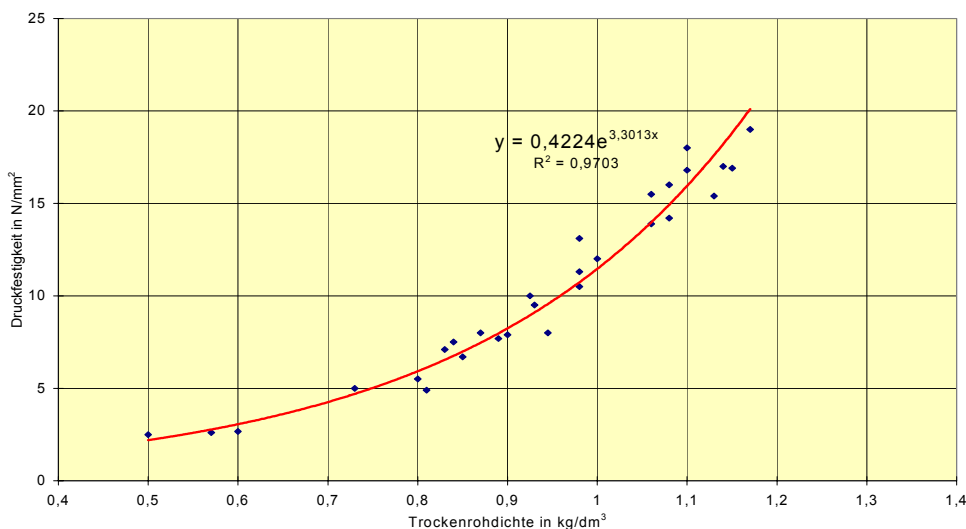
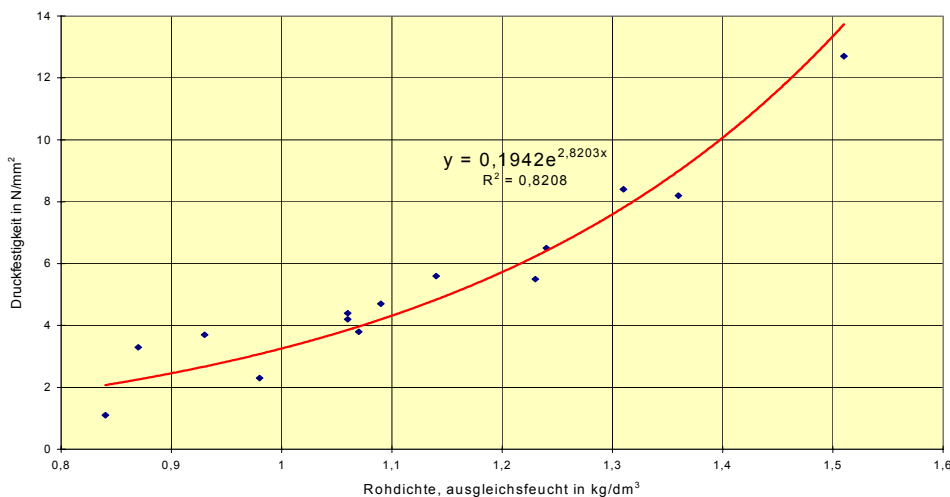


Bild 60: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der **ausgleichsfeuchten Rohddichte** bei Schaummörteln aus **HAZ** (Lagerung bei 10/85)



4.6.3.3 Abhängigkeit vom Schaumanteil und W/B-Wert

Die Druckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten von Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS mit unterschiedlichen Schaumanteilen nach 28tägiger Erhärtung bei 10/85 zeigt Tabelle 29. In Bild 61 ist die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Trockenrohddichte (realisiert durch unterschiedliche Schaumanteile) von Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS mit variierenden W/B-Werten dargestellt.

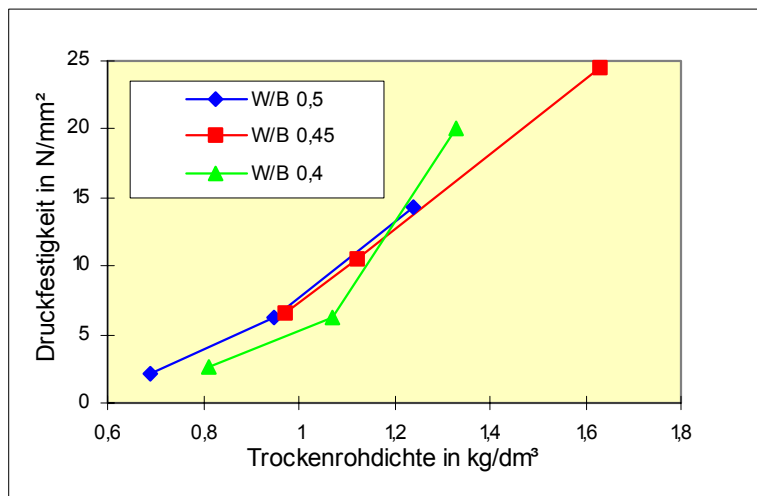
Tabelle 29: Ergebnisse von Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS mit unterschiedlichen Schaumanteilen

	β_D in N/mm ²			E-Modul in N/mm ²			ρ_{fest} in kg/dm ³		
	3 : 1	2 : 1	1 : 2	3 : 1	2 : 1	1 : 2	3 : 1	2 : 1	1 : 2
BML : SM	3 : 1	2 : 1	1 : 2	3 : 1	2 : 1	1 : 2	3 : 1	2 : 1	1 : 2
W/B = 0,4	20,1	6,2	2,7	8600	5500	3100	1,33	1,07	0,81
W/B = 0,45	24,5	10,5	6,5	12300	5400	4300	1,63	1,12	0,97
W/B = 0,5	14,3	6,3	2,2	7100	4400	2000	1,24	0,95	0,69

Daraus kann folgendes abgeleitet werden: Die primär festigkeitsbestimmende Größe ist der Bindemittelanteil, d.h. mit steigendem Schaumanteil nehmen die Druckfestigkeiten, der E-Modul und die Rohdichte ab. Bei geringem Schaumanteil ist der W/B-Wert des Bindemittelleimes die festigkeitsbestimmende Größe. Mit zunehmendem Schaumanteil jedoch wird die Druckfestigkeit stärker durch die steigende Gesamtporosität als durch den Kapillarporenanteil in der Bindemittelmatrix (durch Variation des W/B-Wertes) beeinflusst. Zum Erreichen der gewünschten niedrigen Festigkeiten und Rohdichten ist es einerseits möglich, den W/B-Wert des Bindemittelleimes bei konstantem Schaumanteil oder die Schaumzugabe zum Bindemittelleim bei konstantem W/B-Wert zu erhöhen. Die günstigere Variante für das Bauwerk im Hinblick auf die maximale Reduzierung des Feuchteintrages ist eine hohe Schaumdosierung bei dem niedrigst möglichen W/B-Wert. Dabei darf der Bindemittelleim jedoch nicht zu steif sein, da ansonsten die gleichmäßige Verteilung der Schaumblasen im Bindemittelleim nicht mehr gewährleistet ist bzw. die dazu notwendigen Mischzeiten zu lang werden,

wodurch ein zu großer Anteil der Luftporen zerstört werden würde. Der optimale W/B-Wert für die baupraktische Realisierung hängt neben dem Wasseranspruch des jeweiligen Bindemittels auch von der Mischtechnik vor Ort ab. Im allgemeinen ist eine gleichmäßige Schaumverteilung sowie gute Förder- und Pumpfähigkeit bei W/B-Werten zwischen 0,48 und 0,55 gegeben.

Bild 61: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Trockenrohdichte bei variablen W/B-Werten (CEM I 42,5 R-HS-SM)



4.6.3.4 Abhängigkeit von der Bindemittelart

Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeits- und Rohdichtebestimmungen an 28 Tage bei 10/85 gelagerten Normprismen unterschiedlicher Bindemittel ohne und mit Schaum (W/B = 0,5; BML : SM = 2 : 1). Die chemisch-mineralogische, physikalische und mörteltechnische Charakterisierung der Bindemittel erfolgte unter 4.4.

Tabelle 30: Druckfestigkeit, E-Modul und Trockenrohdichte verschiedener Bindemittel und Schaummörtel nach 28 d bei 10/85

	Bindemittel			Schaummörtel		
	β_D in N/mm ²	E-Modul in N/mm ²	ρ_{fest} in kg/dm ³	β_D in N/mm ²	E-Modul in N/mm ²	ρ_{fest} in kg/dm ³
CEM I 42,5 R-HS	36,2	13500	1,64	8,3	5300	0,85
CEM III/B 32,5 NW-HS	28,6	13000	1,60	7,8	4900	0,90
HAZ	20,2	10800	1,61	4,8	3600	0,89
Romankalk	15,2	10200	1,37	4,8	4200	0,96

4.6.3.5 Abhängigkeit von der Prüfkörpergeometrie

Nach DIN 4164 [A1] wird der Druckfestigkeitsnachweis nur für tragende Bauteile gefordert, geprüft an Würfeln mit Kantenlängen von 7 bis 10 cm. Bei Prüfung des ISM als Sonderform des Leichtbetones kommen 10er und 15er Würfel in Betracht, bei der Prüfung als spezielle Form von Mörtel Normprismen der Abmessung 4·4·16 cm³. Da

die Zuordnung aufgrund der speziellen Eigenschaften des ISM nicht eindeutig ist und die zu verwendende Prüfkörpergeometrie auch von praktischen Belangen abhängt (beispielsweise eignen sich großformatige Prüfkörper z.B. 10er und 15er Würfel eher für die Baustellenüberwachung, während Normprismen bei den Laboruntersuchungen für die meisten Festmörteluntersuchungen günstiger sind), wurden auch Druckfestigkeitsuntersuchungen gleicher Bindemittel- und Schaummörtelmischungen mit unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse an 28 Tage bzw. 90 Tage bei 10/85 erhärteten Bindemittel- und Schaummörtelproben aus CEM I 42,5 R-HS und HAZ (W/B = 0,5; BML : SM = 2 : 1) zeigt Tabelle 31. Die Faktoren in den Zeilen 5 und 10 gelten für die Umrechnung der Prismendruckfestigkeit in die Würfeldruckfestigkeit.

Tabelle 31: Druckfestigkeiten des HAZ und CEM I 42,5 R-HS nach 28 d und 90 d bei 10/85 in Abhängigkeit von der Prüfkörpergeometrie

	HAZ		CEM I 42,5 R-HS	
	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM
28d Prismen	20,2	4,8	36,3	8,3
28d 15er Würfel	16,4	4,2	31,7	6,7
Faktor	0,81	0,88	0,88	0,81
90d Prismen	21,3	5,8	49,5	12,7
90d 15er Würfel	18,7	4,4	44,6	9,7
Faktor	0,88	0,76	0,90	0,76

Für die Prüfung von Injektionsmörteln, die nach einer bestimmten Standzeit am Objekt durch Bohrkerne (Durchmesser 10 cm) entnommen werden, eignen sich am besten Bohrkerne mit einem Durchmesser von 5 cm, die entsprechend der Belastungsrichtung am Objekt aus dem 10er Bohrkern herausgebohrt und anschließend auf eine Höhe von 5 cm planparallel gesägt werden. Die Ergebnisse für die Umrechnung der Zylinderdruckfestigkeiten in Würfel- bzw. Prismendruckfestigkeiten für Schaummörtel aus CEM I 42,5 R-HS und CEM I 42,5 R (W/B = 0,5, BML : SM = 2 : 1 nach der Pumpe) nach 28tägiger Erhärtung bei 10/85 zeigt Tabelle 32.

Tabelle 32: Druckfestigkeit von Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS und CEM I 42,5 R nach 28 d bei 10/85 in Abhängigkeit von der Prüfkörpergeometrie

	Druckfestigkeit in N/mm ²			Umrechnungsfaktoren		
	Würfel	Prisma	Zylinder	W/P	W/Z	Z/P
CEM I 42,5R-HS	7,5	9,2	7,3	0,81	1,03	0,8
CEM I 42,5 R	6,2	7,8	6,0	0,8	1,03	0,77

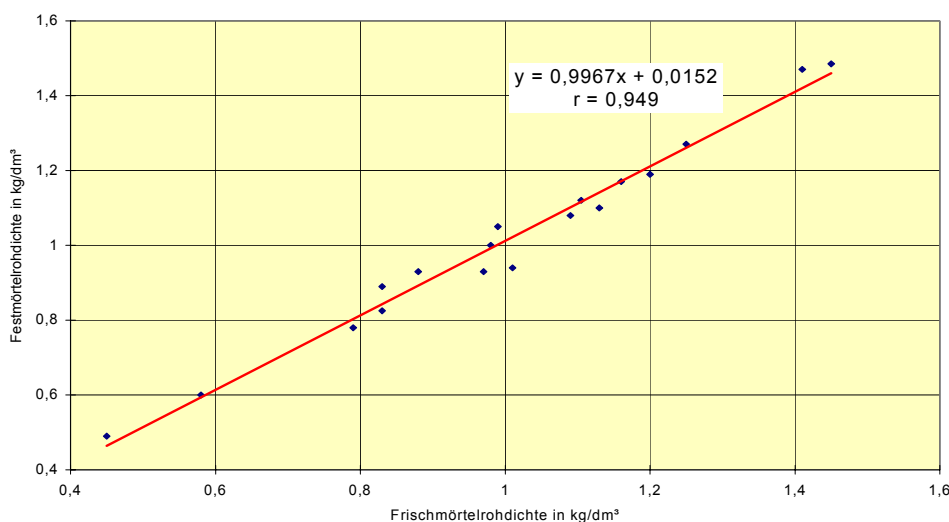
4.6.3.6 Korrelation zwischen Frisch- und Festmörtelrohddichte

Da die Einstellung der gewünschten Schaummörtelparameter wie Festmörtelrohddichte, Druckfestigkeit, E-Modul usw. über den Schaumanteil im frischen Zustand und damit über die Frischmörtelrohddichte erfolgt, ist es wichtig, den Zusammenhang zwischen Frisch- und Festmörtelrohddichte zu kennen. Dabei ist die ausgleichsfeuchte Festmörtelrohddichte, die sich bei bauwerksrelevantem Klima von 10/85 nach einer bestimmten Zeit einstellt (siehe dazu auch [14]) für die Praxis interessanter als die Trockenrohddichte. Auch für die Berechnung der tatsächlich ins Bauwerk eingebrachten Masse ist die Rohddichte im ausgleichsfeuchten, mauerwerkseigenen Zustand maßgebend.

Bild 62 nach Mielke [34] zeigt die ausgleichsfeuchten Festmörtelrohddichten in Abhängigkeit von den Frischmörtelrohddichten nach der Pumpe für ISM aus CEM I 42,5 R-HS. Anhand der linearen Regressionsgeraden (Korrelationskoeffizient $r = 0,949$) wird ersichtlich, daß sich beide Rohdichten nicht unterscheiden. Die zum Anmachen und Fördern des Injektionsschaummörtels notwendige Wassermenge entspricht danach genau der Wassermenge, die für die Hydratation des Zementes benötigt wird sowie als Gleichgewichtsfeuchte in den Poren des Zementsteines bei bauwerksrelevantem Klima verbleibt. Der ISM muß nicht austrocknen wie beispielsweise traßhaltige Verpreßmörtel und gibt somit bei o.g. Klima kein Überschußwasser über das Mauerwerk an die Umgebung ab. D.h. die Mauerwerksfeuchte wird auch während der Erhärtung nicht erhöht. Das hohe Wasserrückhaltevermögen des ISM (siehe dazu 4.5.4) sorgt bereits während der Injektion dafür, daß nur geringe Feuchtemengen vom kontaktierten Mauerwerk aufgenommen werden.

Beim ISM auf der Basis von HAZ ist nach Ergebnissen von Mielke [34] die Tendenz zu etwas niedrigeren ausgleichsfeuchten Festmörtelrohddichten zu erkennen.

Bild 62: Ausgleichsfeuchte Festmörtelrohddichten (10/85) in Abhängigkeit von den Frischmörtelrohddichten (ISM aus CEM I 42,5 R-HS)



4.6.3.7 Korrelation zwischen dem dynamischen und statischen E-Modul

Das Prüfverfahren für den dynamischen E-Modul wurde bereits unter 4.6.1 beschrieben. Die Querdehnzahl nach 28 Tagen bei 10/85 liegt in Abhängigkeit von der Art des Bindemittels zwischen 0,25 und 0,27.

Die Bestimmung des statischen E-Moduls erfolgte nach DIN 1048 Teil 5 [A16]. Dazu wurden die Prüfmaschinen Tiratest 24100 (für die ISM-Proben) und ED 60 (für die Purzementproben) sowie eine Meßvorrichtung der Fa. ELE eingesetzt. Die Meßvorrichtung besteht aus zwei im Abstand von 150 mm fixierten Metallringen, die durch zwei induktive Wegaufnehmer miteinander verbunden sind. Die durch induktive Wegaufnahme bestimmte Längsdehnung wird an einem Meßverstärker angezeigt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug $0,37 \text{ N/mm}^2$ je Sekunde. Die Messung erfolgte an zylindrischen Prüfkörpern (Durchmesser = 15 cm, Höhe = 30 cm) aus CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum nach 28tägiger Erhärtung bei 10/85.

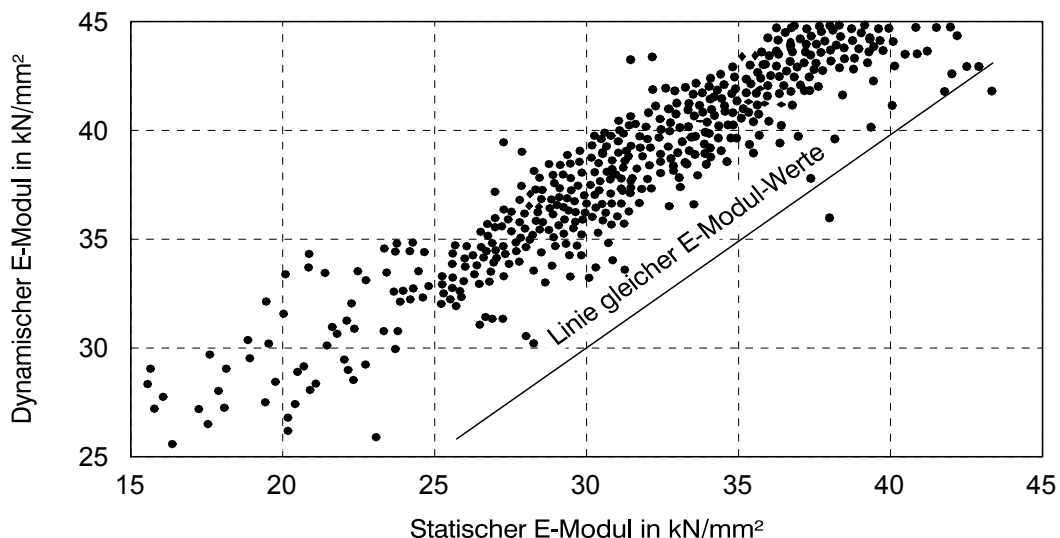
Berechnung des statischen E-Moduls:

$$E_{\text{stat}} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (\text{N/mm}^2)$$

- σ_o ... obere Prüfspannung (= 1/3 der Druckfestigkeit)
- σ_u ... untere Prüfspannung
- ε_o ... gemessene obere Dehnung bei σ_o
- ε_u ... gemessene untere Dehnung bei σ_u

Der wesentliche Unterschied beider Prüfmethoden besteht darin, daß bei der statischen Messung im Verlauf des Kraftanstieges bis zum oberen Prüfspannungswert bereits plastische Verformungen eintreten können, während bei der dynamischen Prüfung rein elastische Verformungen auftreten. Deshalb wird der statische E-Modul in der Regel kleiner sein als der dynamisch bestimmte (siehe auch Bild 63).

Bild 63: Zusammenhang zwischen statischem und dynamischem E-Modul für Beton nach



Roth [42]

Ermitteltes Verhältnis $E_{\text{stat}}/E_{\text{dyn}}$ beim CEM I 42,5 R-HS mit und ohne Schaum nach 28 d:

$$BM_{\text{pur}} = 0,96$$

$$ISM = 0,91$$

Damit kann für Berechnungen zum Verformungsverhalten der statische E-Modul für Injektionsgut aus CEM I 42,5 R-HS-Schaummörtel in der folgenden Weise aus dem experimentell bestimmten dynamischen E-Modul berechnet werden:

$$E_{\text{stat}} = 0,91 \cdot E_{\text{dyn}}$$

4.6.4 Biegezugfestigkeit und Zugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit wurde gemäß DIN 1164-1 bestimmt (Tabellen 33 und 36). Zur Erfassung der Zugfestigkeiten wurden an den Stirnseiten der Normprismen mit einem Epoxidharzkleber (Harz T19-32, Härter H10-58, Leuna Harze AG) Stahlwinkel aufgeklebt und die Prüfkörper auf axiale Zugfestigkeit geprüft (Tabellen 34 und 35, siehe dazu auch Bild 91 unter 4.7.2.1).

Tabelle 33: Biegezugfestigkeiten des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum in Abhängigkeit von den Lagerbedingungen und von der Erhärtungsdauer

Prüfalter in d	Biegezugfestigkeit in N/mm ²							
	HAZ-BM _{pur}		HAZ-SM		CEM I 42,5 R- HS-BM _{pur}		CEM I 42,5 R- HS-SM	
	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85
7	2,6	2,5	0,8	0,9	3,5	3,3	1,6	1,8
28	2,3	2,5	0,8	1,5	2,9	3,3	1,5	2,3
90	2,1	2,5	0,8	1,5	2,9	3,4	1,0	2,2

Tabelle 34: Zugfestigkeit des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum in Abhängigkeit von den Lagerbedingungen und von der Erhärtungsdauer

Prüfalter in d	Zugfestigkeit in N/mm ²					
	HAZ-BM _{pur}		HAZ-SM		CEM I 42,5 R-HS-SM	
	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85	20/95/65	10/85
7	1,2	1,1	0,36	0,32	0,31	0,27
28	0,73	1,16	0,30	0,41	0,31	0,45
90	0,50	1,2	0,25	0,58	0,33	0,60

Tabelle 35: Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom W/B-Wert und vom Schaumanteil am Beispiel des CEM I 42,5 R-HS

β_z in N/mm ²			
BML : SM vol.	3 : 1	2 : 1	1 : 1
W/B = 0,4	1,16	0,86	0,56
W/B = 0,45	1,42	1,1	0,65

W/B = 0,5	1,12	0,7	0,37
-----------	------	-----	------

Tabelle 36: Biegezugfestigkeit verschiedener Bindemittel in N/mm² mit und ohne Schaum nach 28 Tagen bei 10/85

	BM _{pur}	SM
CEM I 42,5 R-HS	3,3	2,3
CEM III/B 32,5 L/NW-HS	3,1	1,9
HAZ	2,5	1,5
Romankalk	2,3	1,5

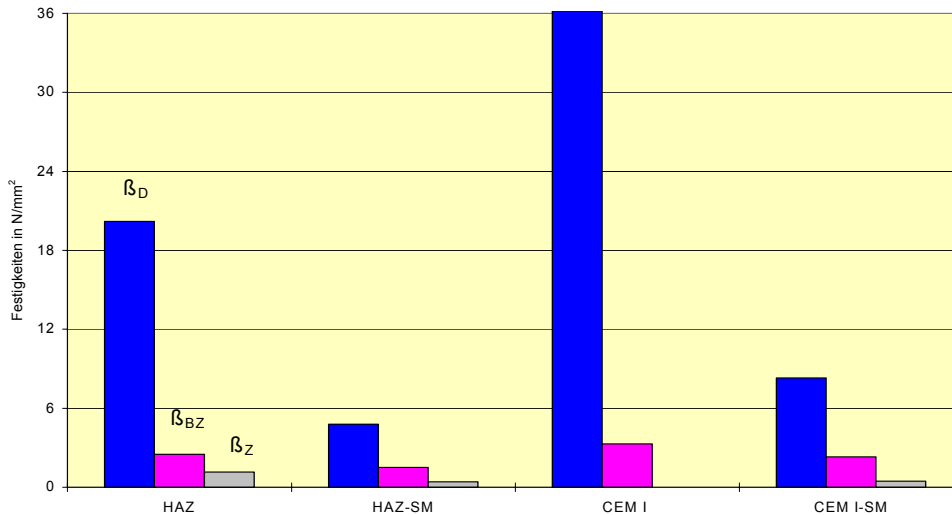
4.6.5 Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Festigkeiten

Die Verhältnisse der Festigkeiten zueinander veranschaulichen Tabelle 37 und Bild 64 am Beispiel des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum (W/B = 0,5; BML : SM = 2 : 1) nach Lagerung bei 10/85.

Tabelle 37: Festigkeiten nach Lagerung bei 10/85 in N/mm² und Festigkeitsverhältnisse beim HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum

HAZ	β_D		β_{BZ}		β_Z		Verhältnis $\beta_Z : \beta_{BZ} : \beta_D$	
	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM
7 d	15,1	1,8	2,5	0,9	1,1	0,32	1 : 2,3 : 13,7	1 : 2,8 : 5,6
28 d	20,2	4,8	2,5	1,5	1,16	0,41	1 : 2,1 : 17,4	1 : 3,6 : 11,7
90 d	21,3	5,8	2,5	1,5	1,2	0,58	1 : 2,1 : 17,7	1 : 2,6 : 10
CEM I 42,5 R-HS							$\beta_{BZ} : \beta_D$	$\beta_Z : \beta_{BZ} : \beta_D$
7 d	33,2	7,8	3,3	1,8	n.b.	0,3	1 : 10	1 : 6 : 26
28 d	36,2	8,3	3,3	2,3	n.b.	0,45	1 : 11	1 : 5,1 : 18
90 d	49,5	10,7	3,4	2,2	n.b.	0,6	1 : 14,5	1 : 3,6 : 17,8

Bild 64: Druck-, Biegezug- und Zugfestigkeiten des HAZ und CEM I 42,5 R-HS (BM_{pur} und SM) nach 28 Tagen bei 10/85



Die Schaumzugabe wirkt sich am stärksten auf die Druckfestigkeit aus. Sie wird in Abhängigkeit vom Schaumanteil, der Bindemittelart und den Lagerungsbedingungen ca. auf ein Fünftel bis ein Drittel der Druckfestigkeit des erhärteten Bindemittels ohne Schaum ($WB = 0,5$) gesenkt. Der Einfluß auf die Biegezug- und Zugfestigkeit ist wesentlich geringer. Hierbei treten Reduzierungen zwischen 30 % und 50 % der vergleichbaren Werte ohne Schaum auf. Die Unterschiede zwischen Druck-, Biegezug- und Zugfestigkeit sind beim HAZ geringer als beim CEM I 42,5 R-HS.

Die Verhältnisse der Festigkeiten zueinander werden durch die erhöhte Porosität positiv beeinflusst. Insbesondere die günstigeren Verhältnisse zwischen Biegezug- und Druckfestigkeit (vgl. ca. 1 : 3 bis 1 : 5 beim Schaummörtel und ca. 1 : 8 bis 1 : 14,5 beim erhärteten Purzement) verbunden mit niedrigeren E-Moduln wirken sich positiv auf die Belastbarkeit des Mauerwerkes nach der Injektion aus.

4.6.6 Gesamtporosität und Wasseraufnahmegrad

Die Trockenrohddichte (40°C), Reindichte, Gesamtporosität und den Wasseraufnahmegrad unterschiedlicher Bindemittel ohne und mit Schaum (BML:SM=2:1) nach 28tägiger Wasserlagerung und 56tägiger Lagerung bei 10/85 (BML:SM=1:1) zeigen die Tabelle 38 und 39.

Die Abnahme der Rohddichte durch die Schaumzugabe bewirkt eine Zunahme der Gesamtporosität und der Wasseraufnahme (Bild 65). Die Erhöhung der Gesamtporosität und der Wasseraufnahme bei gleichem W/B-Wert und Schaumvolumen ist von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bindemittels abhängig.

Tabelle 38: Dichten, Gesamtporosität und Wasseraufnahme von HAZ und Romankalk ohne und mit Schaum nach 28 d Wasserlagerung bei 10°C

	ρ_{roh} in kg/dm^3	ρ_{rein} in kg/dm^3	GP in %	WA in %
Bindemittel				
HAZ	1,57	2,59	39,4	17,9

Romankalk	1,37	2,63	47,9	27,1
Schaummörtel				
HAZ	0,99	2,53	60,9	32,4
Romankalk	0,96	2,60	63,1	36,1

	HAZ	Romankalk
Erhöhung der Gesamtporosität durch den Schaum:	21,5 %	15,2 %
Erhöhung der Wasseraufnahme durch den Schaum:	14,5 %	9 %

Tabelle 39: Dichten, Gesamtporosität und Wasseraufnahme von HAZ, CEM I 42,5 R-HS und CEM III/B 32,5 NW/HS ohne und mit Schaum nach 56 d bei 10/85

	ρ_{roh} in kg/dm^3	ρ_{rein} in kg/dm^3	GP in %	WA in %
Bindemittel				
HAZ	1,37	2,68	49,4	22
CEM III/B 32,5 NW/HS	1,38	2,62	47,3	23,8
CEM I 42,5 R-HS	1,41	2,50	43,6	23,2
Schaummörtel				
HAZ	0,83	2,68	69,1	48
CEM III/B 32,5 NW/HS	0,90	2,46	63,6	42
CEM I 42,5 R-HS	0,80	2,49	67,8	37,1

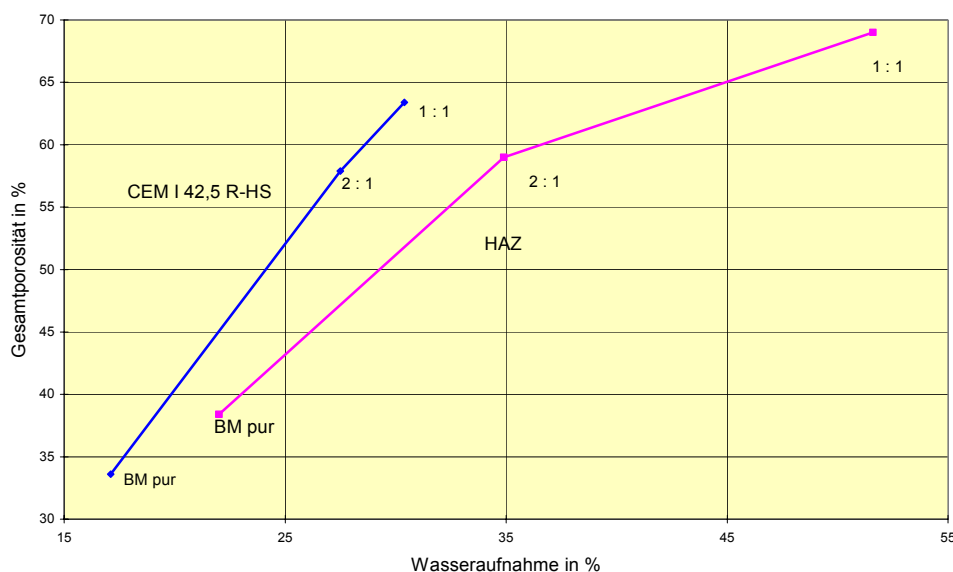
	HAZ	CEM III/B	CEM I
Erhöhung der Gesamtporosität durch den Schaum:	19,7 %	16,3 %	24,2 %
Erhöhung der Wasseraufnahme durch den Schaum:	26 %	18,2 %	13,9 %

Tabelle 40: Dichten, Gesamtporosität und Wasseraufnahme von HAZ und CEM I 42,5 R-HS nach 1a Wasserlagerung bei 10°C in Abhängigkeit vom Schaumanteil

Nr.	ρ_{roh} in kg/dm^3	ρ_{rein} in kg/dm^3	GP in %	WA in %
CEM I 42,5 R-HS				
BM _{pur}	1,56	2,35	33,6	17,1
SM 2 : 1	0,98	2,33	57,9	27,5
SM 1 : 1	0,85	2,32	63,4	30,4
HAZ				
BM _{pur}	1,46	2,37	38,4	22
SM 2 : 1	1,00	2,45	59,0	34,9
SM 1 : 1	0,76	2,46	69,0	51,6

Bild 65: Zusammenhang zwischen Gesamtporosität und Wasseraufnahme beim HAZ und

CEM I 42,5 R-HS nach 1a Wasserlagerung bei 10°C



4.6.7 Kapillare Wasseraufnahme und -abgabe

Die Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgte in Anlehnung an DIN 52617 an Prüfflächen von ca. 16 cm². Die Probekörper (ca. 4·4·4 cm³) wurden vor dem Saugen mit Paraffin ummantelt.

Da sich bei den erhärteten Bindemitteln und Schaummörteln ein annähernd linearer Kurvenverlauf der flächenbezogenen Wasseraufnahme in kg/m² in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Zeit ergab, wurde der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient aus der Steigung dieser Geraden berechnet (Tabelle 41):

$$\omega_t = \frac{\Delta W_t}{\Delta \sqrt{t}}$$

Tabelle 41: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient in kg/m² h^{0,5} beim HAZ und CEM I 42,5 R-HS in Abhängigkeit vom Schaumanteil und W/B-Wert

	HAZ				CEM I 42,5 R-HS			
BML : SM	BM _{pur}	2 : 1	1 : 1	1 : 2	BM _{pur}	2 : 1	1 : 1	1 : 2
W/B = 0,4	1,6	2,4	2,5	1,5	1,9	n.b.	n.b.	n.b.
W/B = 0,45	2,3	4,2	3,4	2,5	2,8	2,9	2,1	1,9
W/B = 0,5	2,5	4,8	4,0	3,3	3,7	2,8	1,8	1,4

Die Bilder 66 und 67 zeigen die flächenbezogene Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Zeit für HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum bei konstantem W/B-Wert von 0,5.

Bild 66: Kapillare Wasseraufnahme des CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum (W/B=0,5)

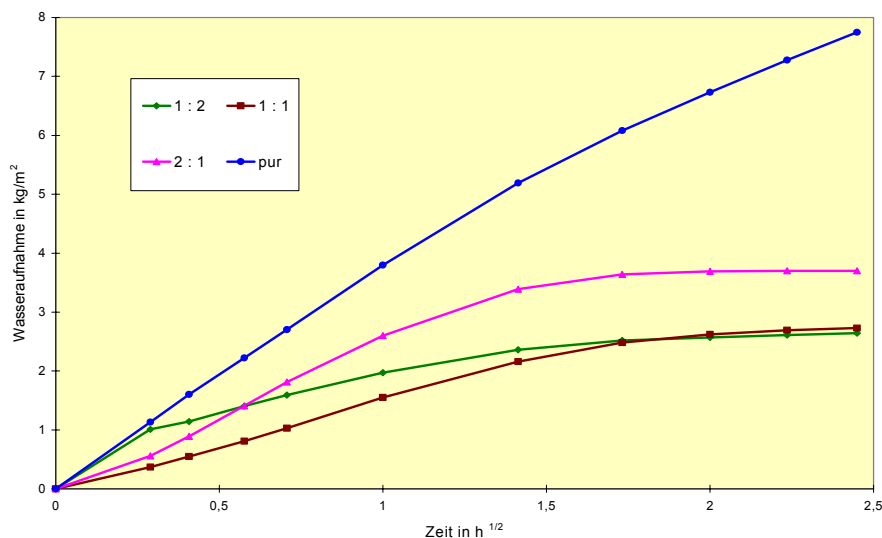
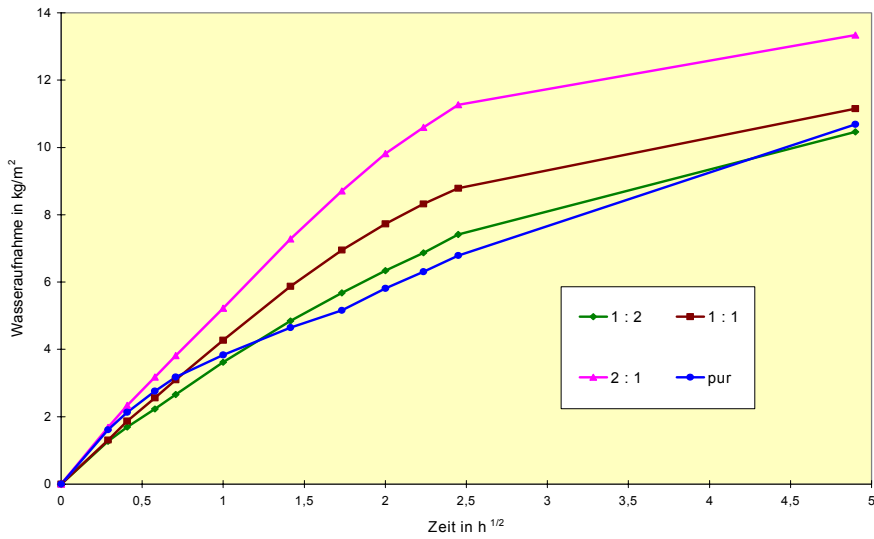


Bild 67: Kapillare Wasseraufnahme des HAZ ohne und mit Schaum (W/B=0,5)



Die Bilder 68 und 69 dokumentieren die Abhängigkeit des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten vom W/B-Wert und Schaumanteil für die Bindemittel HAZ und CEM I 42,5 R-HS.

Bild 68: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient ω_t in Abhängigkeit vom W/B-Wert und Schaumanteil für HAZ

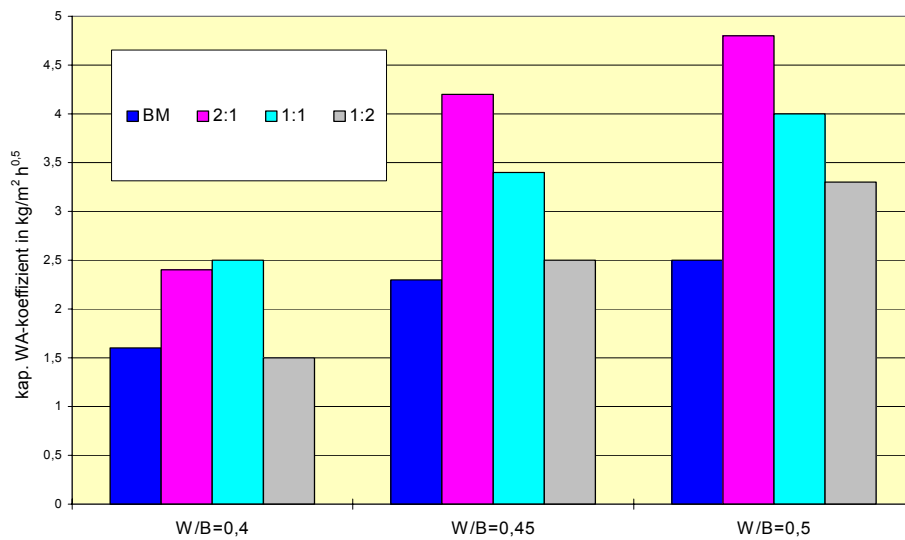
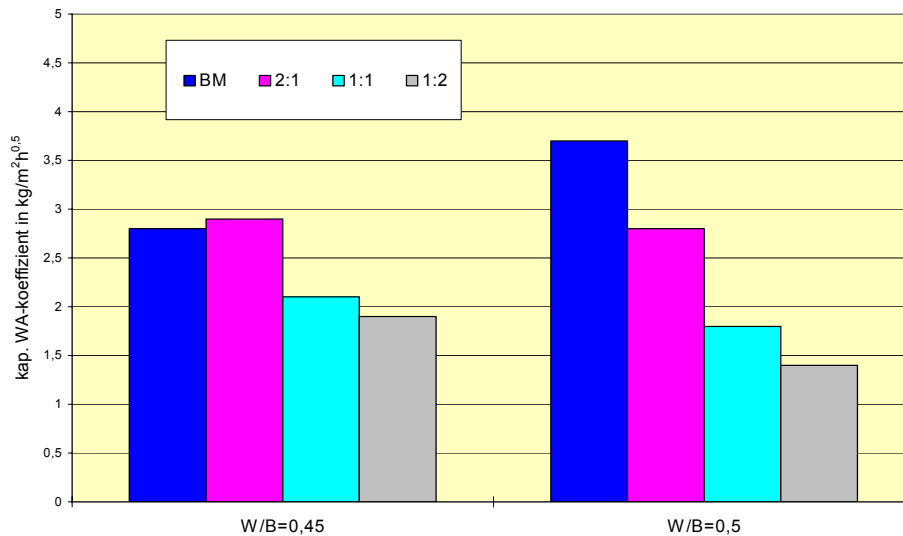


Bild 69: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient ω_t in Abhängigkeit vom W/B-Wert und Schaumanteil für CEM I 42,5 R-HS



Der erhärtete HAZ saugt bei W/B-Werten zwischen 0,4 und 0,5 langsamer als der erhärtete CEM I 42,5 R-HS bei den gleichen W/B-Werten, der CEM I 42,5 R-HS ohne Schaum nimmt jedoch weniger Wasser auf.

Bei einem W/B-Wert von 0,4 sind beide Zementsteine mit $\omega_t \leq 2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ [28] als wasserhemmend zu bewerten. Dabei ist jedoch zu bemerken, daß die Zementsuspensionen mit einem W/B-Wert von 0,4 ohne Zugabe geeigneter Zusatzmittel (Fließmittel, Verflüssiger) nicht injizierbar sind und in jedem Fall ein höherer Druck aufgebracht werden muß. Die ω_t -Werte des erhärteten HAZ sind niedriger als beim CEM I 42,5 R-HS. Die Schaumzugabe wirkt sich bei beiden Bindemitteln kontrovers aus. Beim CEM I 42,5 R-HS tritt durch die Kugelporen eine kapillarbrechende Wirkung ein. Diese ist bei einem W/B-Wert von 0,5 stärker ausgeprägt als bei W/B = 0,45. Schaummörtel aus CEM I 42,5 R-HS ist bei einem W/B-Wert von 0,45 ab einem BML:SM-Verhältnis von 1:2 und bei einem W/B-Wert von 0,5 bereits ab einem BML:SM-Verhältnis von 1:1 (entspricht Frischmörtelrohichten $\leq 0,8 \text{ kg/dm}^3$) als wasserhemmend einzustufen. Die praktische Bedeutung dieses positiven Effektes wird am Beispiel der Kornmarktkirche in Mühlhausen dokumentiert, wo Schaummörtel mit niedriger Rohdichte in Verbindung mit einer Microemulsion zur Reduzierung der kapillar aufsteigenden Feuchte eingesetzt wurde (siehe 8.2).

Beim HAZ saugt das erhärtete Bindemittel weniger als die Schaummörtel. Bei W/B-Werten $> 0,4$ nimmt die kapillare Wasseraufnahme zu. Die Zunahme ist um so größer je geringer der Schaumanteil. Bei kleinem W/B-Wert von 0,4 wirkt sich eine hohe Schaumzugabe positiv aus. Der ω_t -Wert bei hohem Schaumanteil (BML:SM=1:2, W/B=0,4) ist mit dem ω_t -Wert des HAZ ohne Schaum vergleichbar.

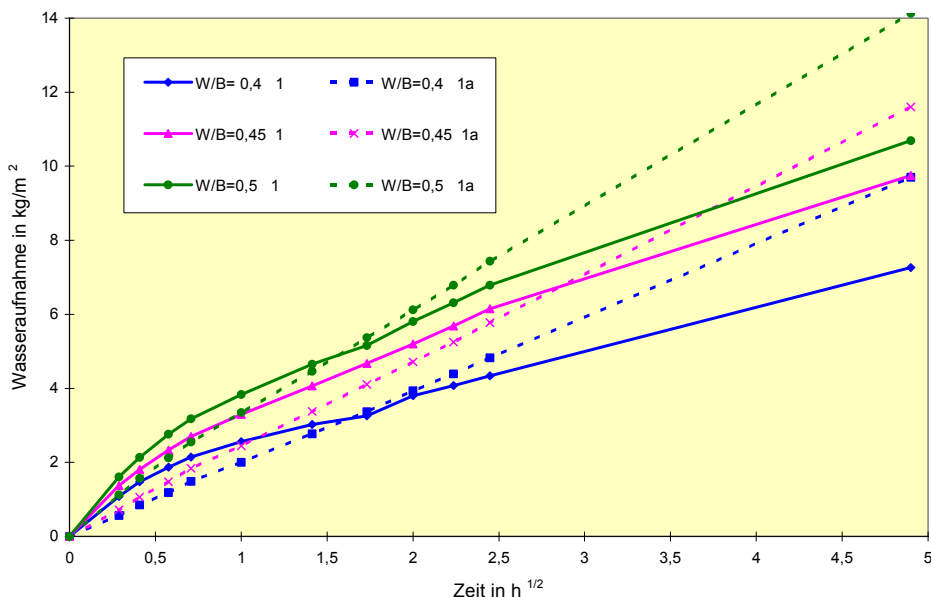
Die ω_t -Werte der Schaummörtel (1,5 bis $4,8 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$) sind in den Bereich von Poren- und Bimsbeton einzuordnen (siehe Tabelle 42).

Tabelle 42: Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen nach [28]

Baustoff	Rohdichte in kg/dm^3	ω_t in $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$
Porenbeton	0,53	2,0
	0,64	4,0
Bimsbeton	0,845	3,0
	1,005	2,0

Bild 70 veranschaulicht den Einfluß der Probenpräparation auf den kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten am Beispiel des HAZ ohne Schaum bei unterschiedlichen W/B-Werten. Die mit 1 bezeichneten Kurven zeigen die kapillare Wasseraufnahme, die an den bei der Probekörperherstellung abgestrichenen Oberflächen bestimmt wurden. Die Bezeichnung 1a kennzeichnet das Saugverhalten, das an den Stirnseiten der Probekörper, die bis zum Entschalen mit der Formenwand kontaktierten, gemessen wurden. Die kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten (gekennzeichnet durch die Anstiege der Geraden) der Prüfkörper, bei denen die Stirnseite saugte (1a) liegen geringfügig höher als die der Prüfkörper mit der abgestrichenen Oberfläche. Das wird wahrscheinlich dadurch bedingt, daß sich durch das Abstreichen nach dem Füllen der Prismenform eine dünne Bindemittelschicht an der Oberfläche mit einzelnen großen Poren ausbildet, die nach der Erhärtung leicht dichtend wirkt, so wie es auch bei Putzen beobachtet wird, die zu ausgiebig geglättet wurden.

Bild 70: Kapillare Wasseraufnahme von HAZ nach unterschiedlicher Probenpräparation



Wasserabgabe

Die Wasserabgabe mineralischer Baustoffe ist durch drei Perioden gekennzeichnet. In der **ersten Trocknungsperiode** wird die Oberflächenfeuchte an die Umgebung abgegeben. Die Massenstromdichte des verdunstenden Wassers bleibt dabei konstant, solange mehr Feuchte aus dem Baustoffinneren an die Oberfläche gelangt, als verdunsten kann. Wenn der kapillare Feuchtetransport nach außen nicht mehr ausreicht, diese Massenstromdichte aufrechtzuerhalten, fällt die Verdunstungsgeschwindigkeit ab, der erste Knickpunkt nach Krischer [6] ist erreicht.

In der **zweite Trocknungsperiode** gehen der Feuchtegehalt in der Probe und die relative Luftfeuchte über der Probe stark zurück. Nur noch im Inneren der Probe ist genügend Feuchte vorhanden, um dort in den Poren den Sättigungsdruck des Wassers aufrechtzuerhalten. Die Wasserabgabe ist in dieser Phase durch die Kapillar- und Diffusionseigenschaften des Baustoffes geprägt. Der zweite Knickpunkt tritt dann ein, wenn der Feuchtetransport nur noch durch Dampfdiffusion erfolgt.

In der **dritten Trocknungsperiode** erfolgt die Austrocknung nur noch durch Dampfdiffusion.

Für die Erfassung der Wasserabgabe wurden die gleichen Prüfkörper verwendet wie für die Erfassung der kapillaren Wasseraufnahme. Die Prüfkörper wurden mit der in Wasser gelagerten Fläche nach oben auf einer Glasplatte bei 20/65 bis zur Massekonstanz (Gleichgewichtsfeuchte) gelagert. Alle anderen Flächen waren abgedichtet, so daß die Wasserabgabe nur über die Fläche erfolgen konnte, über die das Wasser kapillar angesaugt worden ist.

Tabelle 43: Wasserabgabe bis 24 h, Gesamtwasserabgabe in % und Wasserabgabekoeffizient nach Böttger [4] für HAZ- und CEM I 42,5 R-HS-Schaummörtel bei verschiedenen W/B-Werten und Schaumanteilen

	W _{ab24h} in % (und bezogen auf W _{ab})			W _{ab} in %			ω _{ab24h} in kg/m ² h ^{1/2}		
	2 : 1	1 : 1	1 : 2	2 : 1	1 : 1	1 : 2	2 : 1	1 : 1	1 : 2
HAZ									
W/B = 0,4	2,0(22)	2,1(18)	1,8(16)	9,1	11,4	11,3	0,02	0,02	0,02
W/B = 0,45	2,3(16)	2,5 (17)	2,8(16)	13,9	13,4	17,8	0,02	0,02	0,02
W/B = 0,5	2,6(16)	2,4(13)	2,8(14)	16,6	18,7	20,3	0,02	0,02	0,02
CEM I									
W/B = 0,45	3,2(32)	6,5(51)	6,3(50)	9,9	12,8	12,6	0,02	0,03	0,02
W/B = 0,5	6,1(52)	7,0(60)	8,7(64)	11,7	11,7	13,5	0,03	0,03	0,03

Bild 71: Wasserabgabe von HAZ-Schaummörteln (W/B=0,5) bis zur Gleichgewichtsfeuchte bei 20/65

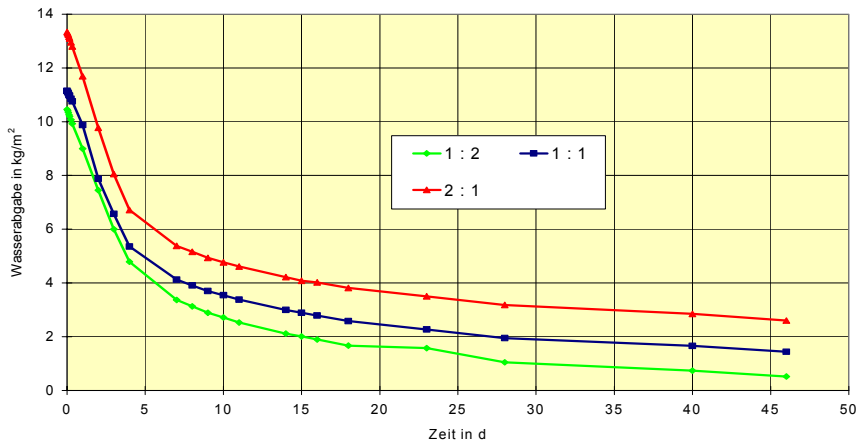


Bild 72: Wasserabgabe von CEM I 42,5 R-HS-Schaummörteln (W/B=0,5) bis zur Gleichgewichtsfeuchte bei 20/65

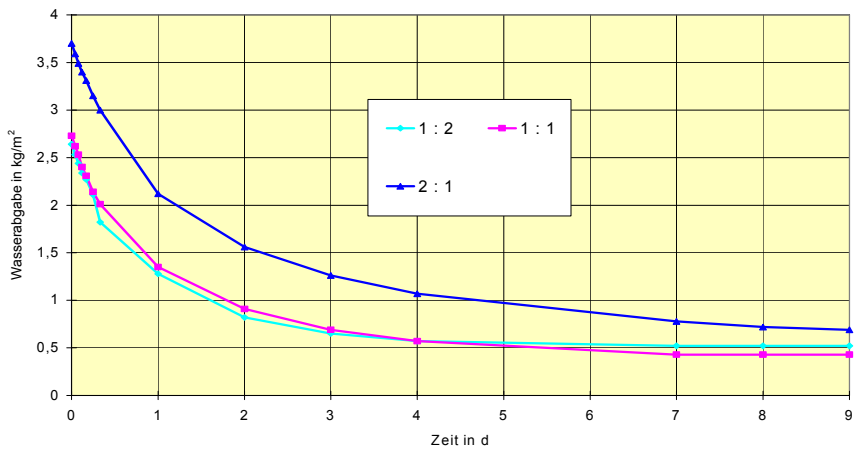
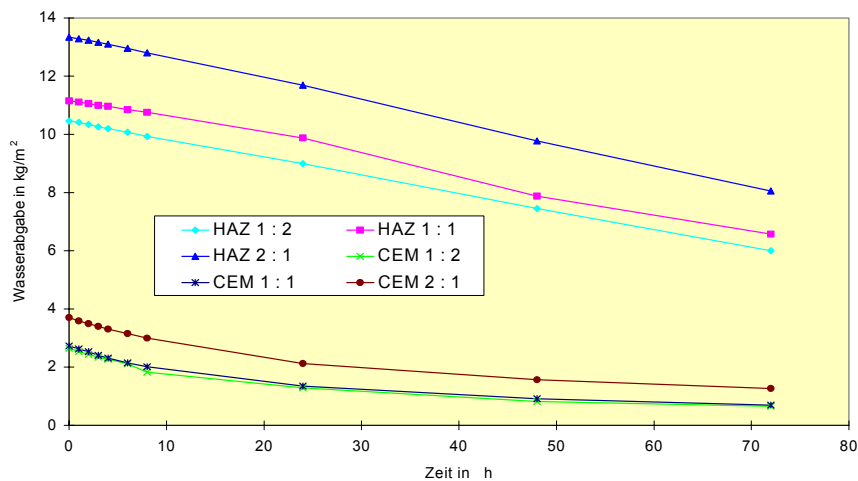


Bild 73: Wasserabgabe von HAZ- und CEM I 42,5 R-HS-Schaummörteln (W/B=0,5) bis zu 72 h



Der HAZ nimmt mehr Wasser auf (Bild 67) und gibt auch mehr Wasser ab als der CEM I 42,5 R-HS (Tabelle 43). Der HAZ trocknet wesentlich langsamer als der CEM I 42,5 R-HS, d.h. er benötigt für die Wasserabgabe bis zur Gleichgewichtsfeuchte bei 20/65 wesentlich länger (46 d, Bild 71) als der CEM I 42,5 R-HS, der bereits nach 9 Tagen Massekonstanz zeigte (Bild 72). Auch die Wasserabgabe innerhalb der ersten 24 Stunden ist beim HAZ geringer als beim CEM I 42,5 R-HS (Spalten 2-4 in Tabelle 43). Beim HAZ ist kein Einfluß des W/B-Wertes und des Schaumanteiles auf die Wasserabgabe innerhalb der ersten 24 Stunden nachweisbar. Bei den Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS nimmt die Wasserabgabe innerhalb der ersten 24 Stunden mit steigendem Schaumanteil und W/B-Wert zu.

Die insgesamt abgegebene Wassermenge nimmt beim HAZ als auch beim CEM I 42,5 R-HS mit steigendem W/B-Wert und Schaumanteil zu.

Die Gleichgewichtsfeuchten nach Rücktrocknung bei 20/65 zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den HAZ- und CEM I 42,5 R-HS- Schaummörteln (Tabelle 44).

Tabelle 44: Gleichgewichtsfeuchte von Schaummörteln bei 20/65

BML:SM	Feuchte in % HAZ			Feuchte in % CEM I 42,5 R-HS		
	2 : 1	1 : 1	1 : 2	2 : 1	1 : 1	1 : 2
W/B = 0,5	6,1	5,5	5,6	5,4	4,9	5,2

Die kapillar aufgenommene Wassermenge, die Sauggeschwindigkeit (charakterisiert durch den ω_t -Wert), die abgegebene Wassermenge und die Gleichgewichtsfeuchte, die sich nach der Trocknung bei dem jeweiligen Klima einstellen, hängen bei den Injektionsmörteln mit gleichem W/B-Werten primär von der Art des Bindemittels ab, vor allem von der Porenstruktur des entsprechenden Zementsteines und der Zusammensetzung der Hydratphasen. Der W/B-Wert wirkt sich stärker auf die kapillare Wasseraufnahme und -abgabe aus als der Schaumanteil.

Durch die Schaumzugabe wird die kapillare Wasseraufnahme stärker beeinflusst als die Wasserabgabe. Ein signifikanter Einfluß des Schaumanteiles und des W/B-Wertes auf die Gleichgewichtsfeuchte wurde nicht festgestellt.

Bei bauwerksrelevantem Klima von 10 °C und 85 % r.F. ist die kapillare Wasseraufnahme sehr gering. Wie anhand der Korrelationen zwischen den Frisch- und Festmörtelrohddichten bei den Schaummörteln festgestellt wurde (siehe 4.6.3.6), entspricht die zum Anmachen und Fördern des Injektionsschaummörtels notwendige Wassermenge der Menge, die für die Hydratation des Zementes benötigt wird sowie als Gleichgewichtsfeuchte in den Poren des Zementsteines bei bauwerksrelevantem Klima verbleibt. D.h. die Kapillarporen sind bereits teilweise mit Wasser gefüllt, wodurch die Sauggeschwindigkeit und die kapillar aufgenommene Wassermenge stark reduziert werden.

4.6.8 Schwinden und Quellen

Die Schwindmessungen erfolgten bei 20°C und 65 % r.F. und 10 °C und 85 % r.F (Tabelle 45). Die Quellmessungen wurden bei Wasserlagerung bei 10 °C durchgeführt.

Tabelle 45: Längenänderung von HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum (BML:SM=2:1) bei 10/85, 20/65 und Wasserlagerung in mm/m

Zeit	BM _{pur}			SM			
	HAZ	10/85	20/65	10°C WL	10/85	20/65	10°C WL
2d	0	0	0	0	0	0	0
7d	0,15	0,14	0,24	0,08	0,20	0,16	0,16
14d	0,22	0,22	0,29	0,12	-0,09	0,22	0,22
21d	0,22	0,21	0,29	0,14	-0,35	0,25	0,25
28d	0,24	0,17	0,32	0,15	-0,53	0,28	0,28
90d	0,32	-0,32	0,37	0,16	-1,26	0,45	0,45
1a	0,46	n.b.	0,49	-0,3	n.b.	0,65	0,65
2a	0,58	n.b.	0,49	-0,55	n.b.	0,68	0,68
3a	0,70	n.b.	0,50	-0,65	n.b.	0,70	0,70
CEM I 42,5 R-HS	10/85	20/65	10°C WL	10/85	20/65	10°C WL	
2d	0	0	0	0	0	0	0
7d	-0,01	-0,21	0,08	-0,11	-0,12	0	0
14d	-0,08	-0,44	0,15	-0,11	-0,5	0,02	0,02
21d	-0,12	-0,71	0,17	-0,11	-0,81	0,03	0,03
28d	-0,14	-1,11	0,27	-0,15	-1,15	0,05	0,05
90d	-0,14	-2,22	0,34	-0,16	-2,44	0,08	0,08
1a	-0,21	n.b.	0,28	-0,34	n.b.	0,15	0,15
2a	-0,19	n.b.	0,33	-0,29	n.b.	0,15	0,15
3a	-0,23	n.b.	0,29	-0,10	n.b.	0,23	0,23

Bild 74: Längenänderung des HAZ ohne und mit Schaum bei 20/65 und 10/85

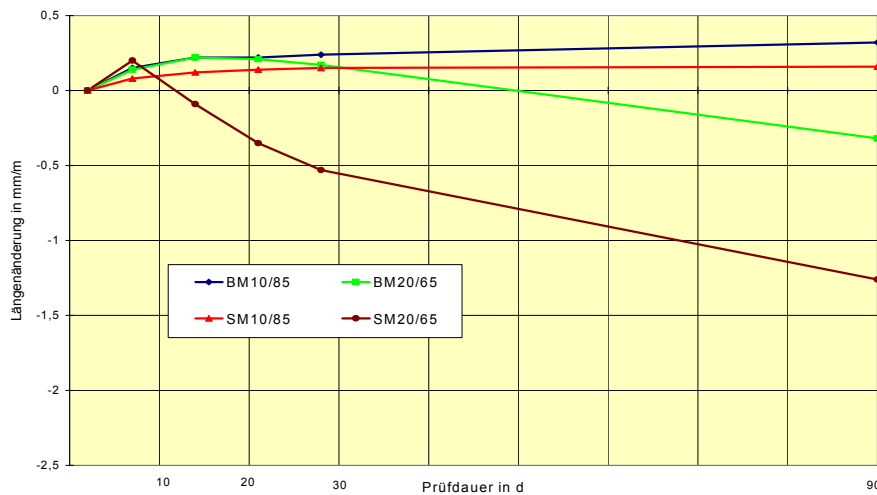
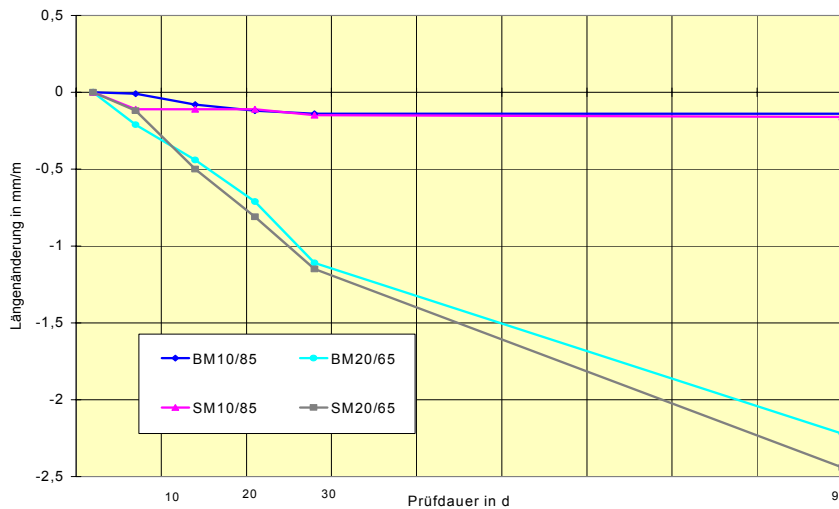


Bild 75: Längenänderung des CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum bei 20/65 und 10/85



Der HAZ ohne und mit Schaum zeigt bei bauwerksrelevantem Klima von 10/85 eine geringe Längenzunahme, während der C₃A-arme PZ und der PZ-Schaummörtel leicht schwinden. Die Schwindmaße bei 20/65 sind beim C₃A-armen PZ wesentlich größer als beim HAZ. Die Schaummörtel schwinden stärker als die erhärteten Bindemittel ohne Schaum.

DIN 4164 [A1] empfiehlt für Schaumbeton ein Schwindmaß nach 28 Tagen von $\leq 0,5$ mm/m. Diese Anforderung kann von den Schaummörteln aufgrund des hohen Bindemittelanteiles nicht erfüllt werden. Das ist auch nicht erforderlich, da der Schaummörtel bei seiner Verwendung im Mauerwerksinneren immer höheren Feuchten ausgesetzt sein wird.

Die Bilder 76 und 77 zeigen die Masseänderung der erhärteten Bindemittel und Schaummörtel aus HAZ und C₃A-armem Zement bei 20/65 und 10/85 bedingt durch die Wasserabgabe über die gesamte Prüfkörperoberfläche (im Gegensatz zur kapillaren Wasserabgabe).

Bild 76: Masseänderung der erhärteten Bindemittel und Schaummörtel aus HAZ bei 20/65 und 10/85

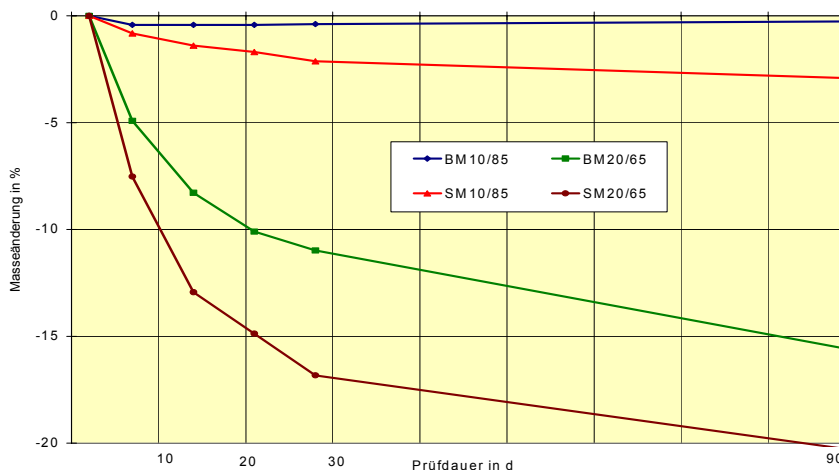
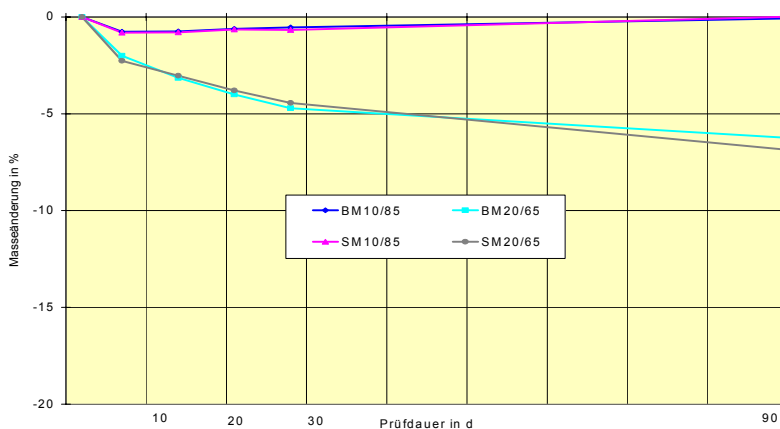


Bild 77: Masseänderung der erhärteten Bindemittel und Schaummörtel aus CEM I 42,5 R-HS bei 20/65 und 10/85



Die Masseänderung einer Bindemittelart stimmt tendenziell mit den Ergebnissen der Längenänderung überein, d.h. stärkeres Schwinden ist i.d.R. auch mit höheren Masseabnahmen verbunden.

Zwischen den Bindemitteln sind jedoch deutliche Unterschiede feststellbar. Der HAZ schwindet weniger als der CEM I 42,5 R-S, zeigt aber eine deutlich höhere Feuchteabgabe, so wie es bereits auch bei der kapillaren Wasserabgabe festgestellt wurde. Bei 10/85 tritt beim HAZ trotz Feuchteabgabe eine leichtes Quellen auf, was mit der Ettringitbildung bei der HAZ-Hydratation in Verbindung gebracht wird. Beim C₃A-armen Zement ist die Masseabnahme immer mit Schwinden verbunden. Die Schaummörtel geben bei gleichem Klima mehr Feuchte an die Umgebungsluft ab als die erhärteten Pur-Bindemittel.

Bei Wasserlagerung (Bild 78) quillt der HAZ-Schaummörtel stärker als der erhärtete HAZ-Purzement. Beim CEM I 42,5 R-HS zeigt der Schaummörtel eine etwas geringere Längenzunahme als der erhärtete Purzement.

Das größte Quellmaß zeigt der Hochofenzement (CEM III/B 32,5 NW-HS) gefolgt vom C₃A-reichen PZ (CEM I 42,5 R, Bild 79). Beim C₃A-armen PZ tritt die geringste Längenzunahme bei Wasserlagerung auf.

Bild 78: Längenänderung des CEM I 42,5 R-HS und HAZ ohne und mit Schaum bei Wasserlagerung

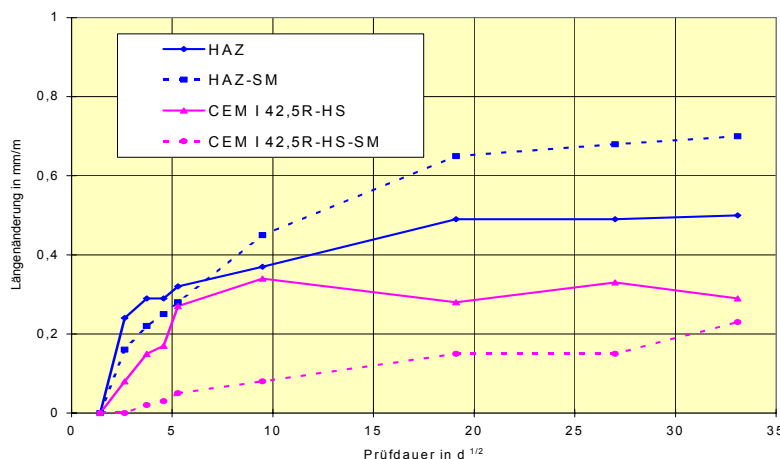
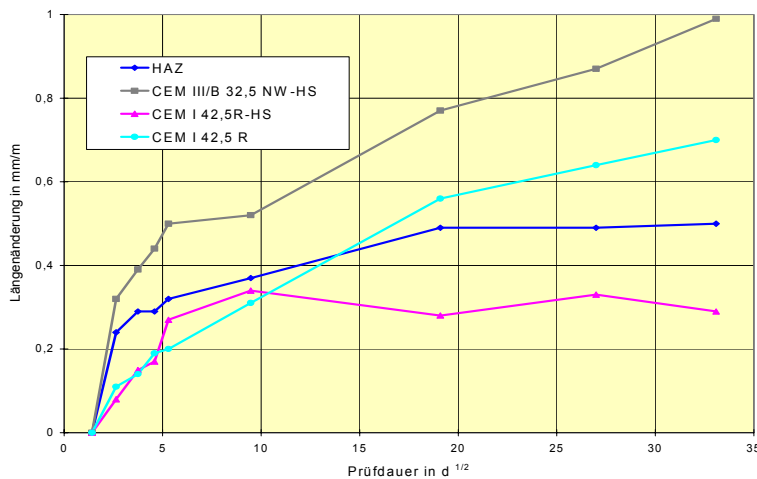
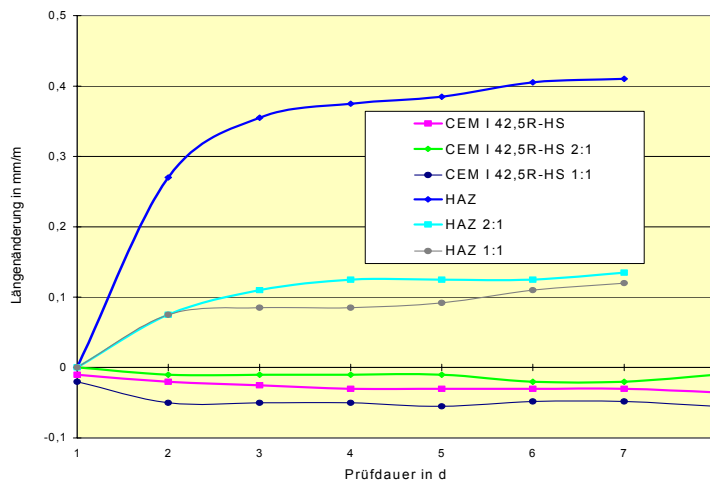


Bild 79: Längenänderung verschiedener Bindemittel (W/B=0,5) bei Wasserlagerung



Da bei den Längenmessungen gemäß DIN 52450 [A3] die ersten Meßwerte frühestens nach 3 Tagen erfaßt werden können (nach dem Entschalen nach 2 Tagen erfolgt i.d.R. die Nullmessung), wurden die Längenänderungen im frühen Stadium ausgewählter Mischungen zusätzlich in der Schwindrinne gemessen (Formengeometrie: 4·4·25 cm³). Die Längenänderungen wurden über induktive Wegaufnehmer erfaßt bei einaxialer Behinderung. Die Messungen erfolgten bei 20°C und ca. 95% r.F. (Folienabdeckung). Der Meßbeginn lag je nach Erstarrungsverhalten zwischen 8 Stunden und 18 Stunden.

Bild 80: Längenänderungen in der Form des HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum (W/B=0,5; BML:SM=2:1 und 1:1) bei 20/95 in mm/m



Das erhärtete Bindemittel und die Schaummörtel aus C₃A-armem PZ schwinden bei 20/95, während die HAZ-gebundenen Mischungen quellen. Dabei ist das Quellmaß, insbesondere die Anfangsdehnung, des HAZ ohne Schaum größer als bei den Schaummörteln. Beim HAZ ohne Schaum sollte aufgrund der vergleichsweise hohen Anfangsdehnung der Nullwert für die Längenmessungen nach dem Entschalen um die Anfangsdehnung (0,28 mm/m nach 2 d) korrigiert werden.

Das Frúschwinden der Mischungen aus C₃A-armen PZ ist mit Werten von maximal -0,05 mm/m gering. Das Frúschwindmaß der Schaummörtel aus CEM I 42,5 R-HS ist geringfügig höher als bei den Purzementproben. Eine Korrektur der Nullwerte für die Längenmessungen nach dem Entschalen ist in diesem Fall nicht erforderlich.

4.6.9 Wasserdampfdiffusionswiderstand

Die Ergebnisse der Prüfung nach dem wet-cup-Verfahren (Lagerung 23/50/95) an 28 Tage bei 10/85 erhärteten Probekörpern (Scheiben mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Dicke von 2 cm) zeigt Tabelle 46. Der W/B-Wert und der Schaumanteil waren bei allen Mischungen konstant (W/B = 0,5; BML : SM = 2 : 1).

Tabelle 46: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]

	Bindemittel	Schaummörtel
CEM I 42,5 R-HS	16	8
CEM I 42,5 R	18	11
CEM III/B 32,5 NW/HS	21	14
HAZ	16	5

Die Größe des μ -Wertes wird vom Bindemittel geprägt. Alle untersuchten erhärteten Bindemittel ohne und mit Schaum sind als wasserdampfdiffusionsoffen anzusprechen. Durch die erhöhte Porosität bei den Schaummörteln nimmt der Wasserdampfdiffusionswiderstand gegenüber den erhärteten Purzementproben ab.

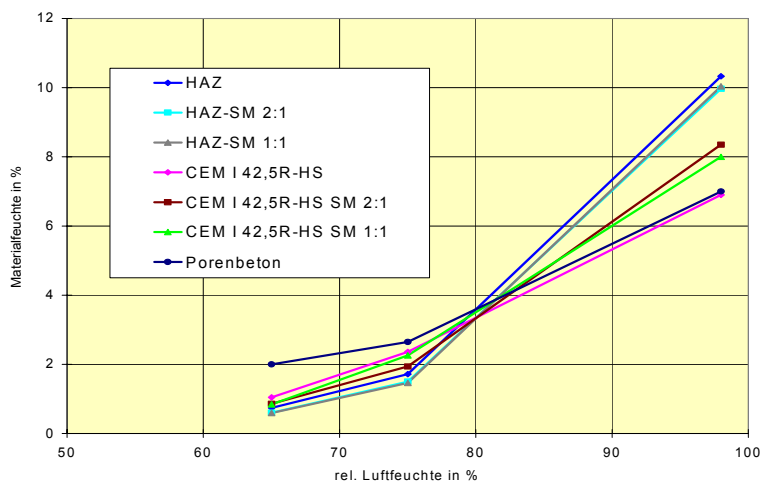
4.6.10 Sorptionsverhalten

Die Sorption beschreibt die Anlagerung von Wassermolekülen auf den inneren Oberflächen poröser Baustoffe. Die Sorptionsfeuchten des jeweiligen Baustoffes sind von der Luftfeuchte und der Temperatur abhängig. Die Feuchtigkeitsaufnahme durch den Baustoff in Abhängigkeit von der Luftfeuchte bei konstanter Temperatur wird durch die Sorptionsisotherme beschrieben.

Die Sorptionsisothermen wurden für ausgewählte Bindemittel ohne und mit Schaum bei 20 °C bestimmt. Dabei wurden die unterschiedlichen relativen Luftfeuchten (65 %, 75 % und 98 %, Bild 81) in einem Bereich eingestellt, der auch baupraktisch für Injektionsmörtel von Bedeutung ist. Deshalb konnte der für zementhaltige Mörtel typische S-förmige Verlauf der Sorptionsisothermen nicht beobachtet werden (siehe u.a. [67]).

Die Sorption der HAZ- und CEM I 42,5 R-HS-Prüfkörper ohne und mit Schaum (W/B=0,5, BML:SM=2:1) erfolgte in Exsikkatoren über gesättigten Salzlösungen gemäß DIN 50008 [A17] im klimatisierten Labor.

Bild 81: Sorptionsisothermen von HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum im Vergleich zu einem Porenbeton nach Venzmer [60] bei 20°C

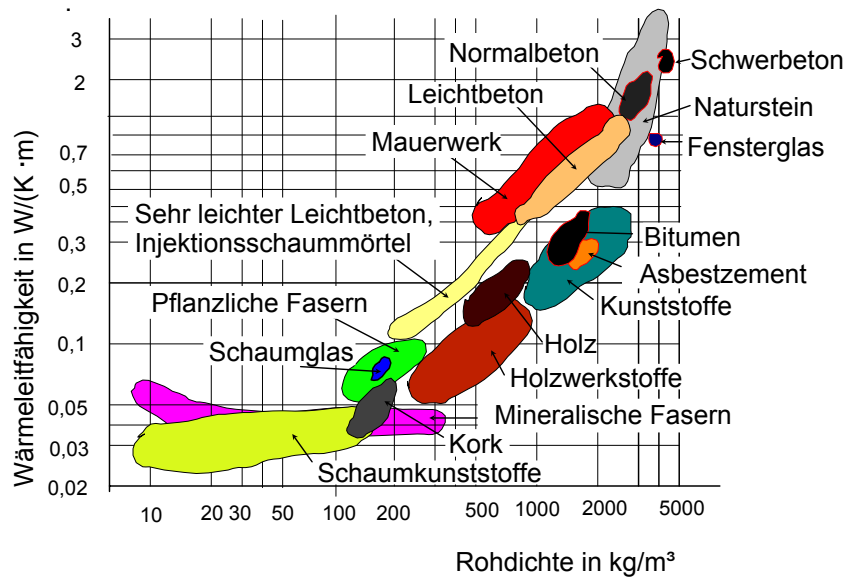


Die Feuchtigkeitsaufnahme aller Prüfkörper nimmt mit steigender Luftfeuchtigkeit zu. Dabei nehmen die HAZ-gebundenen Mörtel mehr Feuchte auf als die Mörtel aus CEM I 42,5 R-HS. Beim CEM I 42,5 R-HS ist die Feuchtigkeitsaufnahme der Schaummörtel bei hoher rel. Luftfeuchte höher als bei dem erhärteten Purzement.

4.6.11 Wärmeleitfähigkeit

Eigene Versuche zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurden nicht durchgeführt. Nach Erfahrungen am FIB bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von schaumhaltigen Mörteln mit dem Wärmestrommeßplattengerät gemäß DIN 52616 [A17] an Prüfkörpern der Abmessung 20·20·4 cm³ lassen sich die Injektionsschaummörtel in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte in folgender Weise einordnen (Bild 82):

Bild 82: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte verschiedener Baustoffe



D.h. Schammörtel kann bei Rohdichten $< 0,5 \text{ kg/dm}^3$ gut als Wärmedämmstoff mit λ -Werten $< 0,2 \text{ W/mK}$ eingesetzt werden.

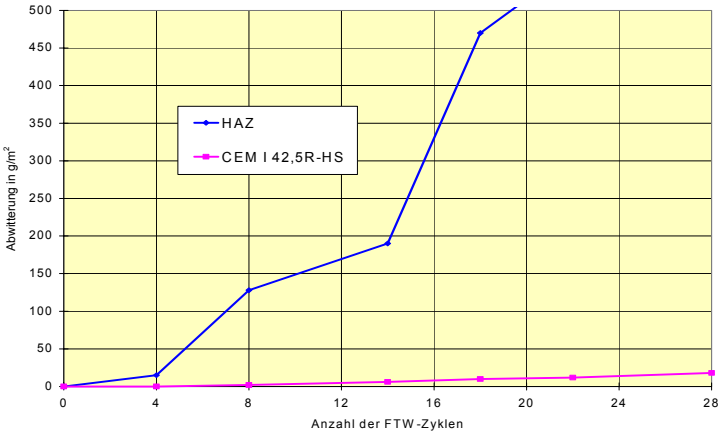
4.6.12 Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel

Die Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit erfolgte nach dem CWF-Verfahren (capillary suction of water and freezing test). Dabei handelt es sich um ein Prüfverfahren für Beton, bei dem die Prüfkörper einer einaxialen Frostbeanspruchung zwischen $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ mit 2 Frost-Tau-Wechseln (FTW) pro Tag ausgesetzt werden. Es zeigt gegenüber herkömmlichen Frostprüfverfahren eine sehr gute Reproduzierbarkeit und geringe Streuung der Meßergebnisse. Das Verfahren läuft in zwei Etappen ab. Vor der eigentlichen Frostbehandlung erfolgt ein einwöchiges kapillares Saugen bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$, wobei die Seitenflächen der Prüfkörper abgedichtet werden. Damit soll simuliert werden, wieviel Wasser der Baustoff in ungünstigstem Fall durch Kapillarkräfte aufnehmen kann. Die Eintauchtiefe der Prüfkörper während der Wasseraufnahme beträgt ca. 10 mm. An diese Behandlung schließt sich das eigentliche Einfrieren der Prüfkörper bis $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ mit insgesamt 28 FTW-Zyklen in 14 Tagen an. Als Beurteilungskriterium der Frostwiderstandsfähigkeit der geprüften Systeme wird die Abwitterung bezogen auf die belastete Fläche (g/m^2) nach 28 FTW sowie die äußere Beschaffenheit der Prüfkörper herangezogen. Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse sowie dem kapillaren Saugen vor der Frostprüfung ist diese Prüfung auch zur Simulation der Beanspruchung bei Mörteln insbesondere bei fehlender oder defekter Mauerwerkssperrung geeignet.

Die Prüfung erfolgte an 6 Würfeln mit einer Kantenlänge von 10 cm, die bis zur Prüfung 28 Tage bei 10/85 lagerten. Die Ergebnisse der Frostprüfung an den erhärteten Schammörteln ($W/B=0,5$; $BML:SM=2:1$) aus HAZ und CEM I 42,5 R-HS dokumentiert Bild 83.

Bild 83: Abwitterung in Abhängigkeit von den FTW-Zyklen für HAZ und CEM I 42,5

R-HS mit Schaum



Die Frostwiderstandsfähigkeit des Schaummörtels aus dem C₃A-armen PZ ist mit einer Abwitterung von nur 18 g/m² als sehr hoch zu bewerten, was auf die Matrix des hochwertigen Zementes und den hohen Anteil an kugligen Poren zurückgeführt wird (Hauptanteil der Luftporen im Bereich zwischen 0,1 und 0,3 mm).

Beim HAZ-Schaummörtel kann bis zu 14 FTW von einer mäßigen Frostwiderstandsfähigkeit ausgegangen werden. Erst oberhalb 14 FTW kommt es zu Gefügeschädigungen, die im weiteren Verlauf mit einer erhöhten Abwitterung verbunden sind. Das vergleichsweise schlechtere Frostwiderstandsverhalten des HAZ ist u.a. mit dem geringeren Hydratationsgrad des HAZ gegenüber dem PZ und damit verbunden geringeren Festigkeiten sowie der höheren Wasseraufnahme zu erklären.

Die Frostwiderstandsfähigkeit beider Schaummörtel geprüft nach dem CWF-Verfahren ist vergleichsweise höher als die handelsüblicher, traßhaltiger Verpreßmörtel.

4.6.13 Carbonatisierung

Zur Messung des Carbonatisierungsfortschrittes in Abhängigkeit vom Porenanteil wurden auf der Basis von HAZ und CEM I 42,5 R-HS Bindemittel- und Schaummörtelprismen der Abmessung 4·4·16 cm³ hergestellt, die bis zum 28. Tag bei bauwerksrelevantem Klima von 10/85 und anschließend in mit 1Vol% CO₂ angereicherter Atmosphäre bei 23 °C und 65 % r.F. lagerten. Das Wasser-Bindemittel-Verhältnis betrug bei allen 6 Mischungen 0,5. Die Carbonatisierungstiefe wurde in 14tägigen Abständen gemessen, indem jeweils 2 Prüfkörper pro Mischung gespalten und die frischen Bruchflächen mit 1%iger Phenolphthaleinlösung besprüht wurden. Aus den 4 bzw. 8 Einzelwerten (Bild 84) wurden die Mittelwerte gebildet (Tabelle 47).

Während die Carbonatisierung bei den Prüfkörpern aus HAZ (SM und BM_{pur}, Bild 85) und dem CEM I 42,5 R-HS ohne Schaum (Bild 86) relativ gleichmäßig von außen nach innen fortschritt, waren die carbonatisierten und nicht-carbonatisierten Bereiche bei den Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS unregelmäßig verteilt (Bild 87), was die Messung der Carbonatisierungstiefe erschwerte.

Bild 84:

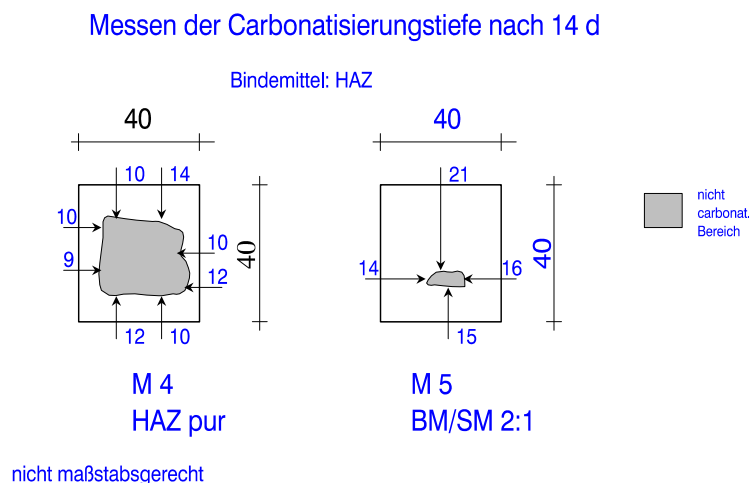


Tabelle 47: Carbonatisierungstiefe in mm in Abhängigkeit von der CO₂-Lagerung
(1Vol% CO₂, 23 °C, 65 % r.F.)

Mischung-Nr.	BML : SM	14 d	28 d	42 d	durchcarbonati-siert nach
CEM I 42,5 R-HS					
1	ohne SM	2	5	7	*)
2	2 : 1	6	8	8	*)
3	1 : 1	8	10	10	110 d
HAZ					
4	ohne SM	11	15	-	110 d
5	2 : 1	16	vollst.	vollst.	21 d
6	1 : 1	vollst.	vollst.	vollst.	14 d

*) Die Messungen wurden nach 110 Tagen abgebrochen. Zu diesem Zeitpunkt waren diese Proben noch nicht vollständig carbonatisiert. vollst. ... vollständig carbonatisiert

Die Bindemittel- und Schaummörtelprüfkörper aus HAZ carbonatisierten wesentlich schneller als die Prüfkörper aus CEM I 42,5 R-HS (Bild 88). Der HAZ-Schaummörtel mit dem größten Porenvolumen (BML:SM=1:1) war bei der Schnellcarbonatisierung bereits nach 14 Tagen durchcarbonatisiert, während die Probe aus CEM I 42,5 R-HS mit dem gleichen Schaumanteil erst nach 110 Tagen vollständig carbonatisiert war. Den Einfluß des Porenvolumens auf die Carbonatisierung veranschaulicht Bild 89 am Beispiel des Bindemittels CEM I 42,5 R-HS. Mit steigendem Schaumanteil nimmt die Carbonatisierung zu.

Bild 85: HAZ-Prüfkörper nach 14tägiger Carbonatisierung (1Vol% CO₂)

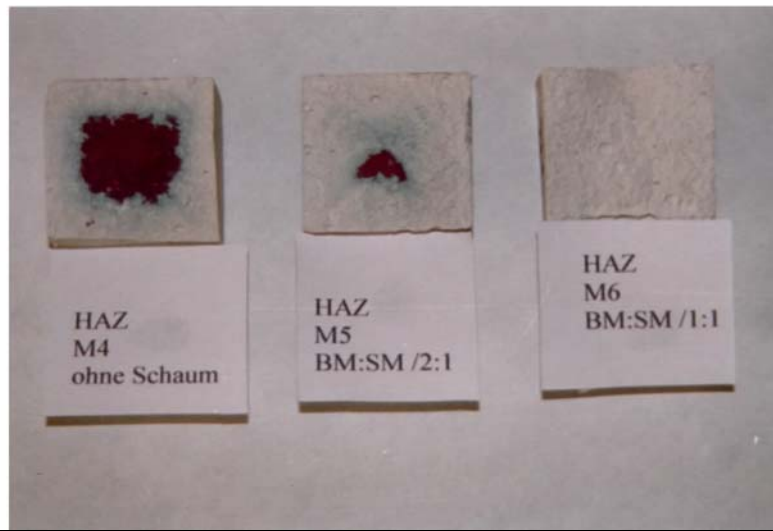
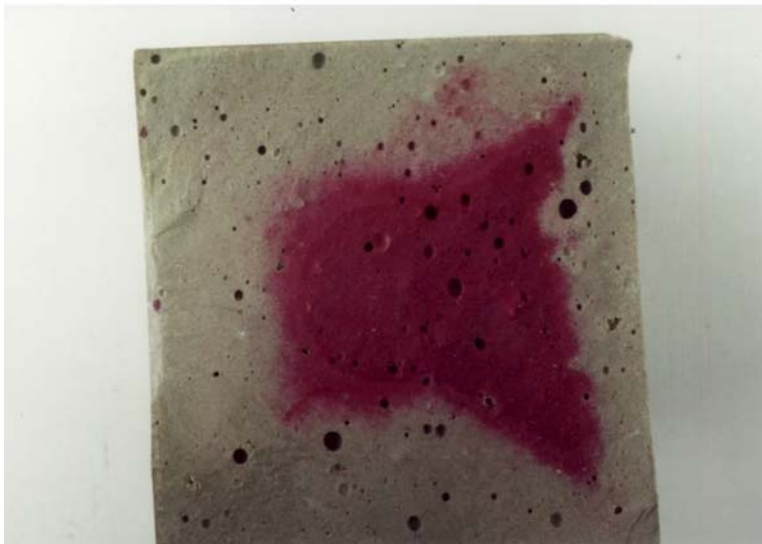


Bild 86: CEM I 42,5 R-HS ohne Schaum nach 70tägiger Carbonatisierung (1Vol%



CO₂)

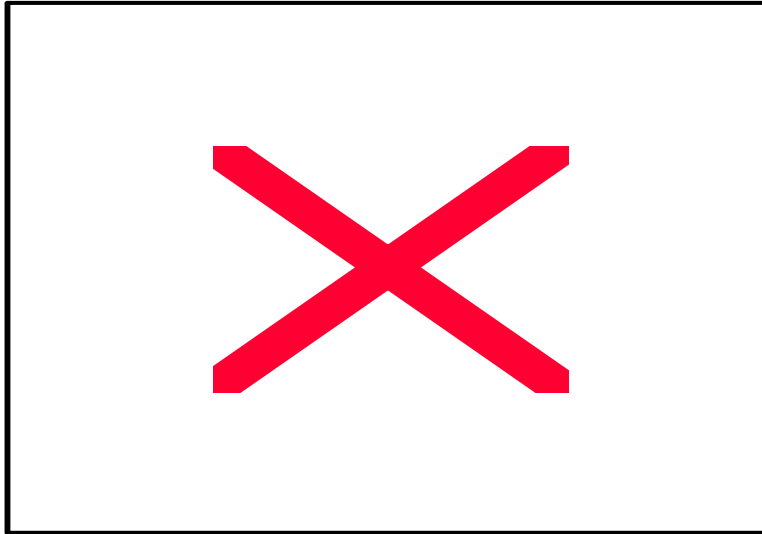


Bild 87: CEM I 42,5 R-HS-Schaummörtel nach 28tägiger Carbonatisierung (1Vol% CO₂)



Bild 88: Carbonatisierungstiefe der Prüfkörper aus HAZ und CEM I 42,5 R-HS nach 14tägiger Carbonatisierung (1Vol% CO₂)

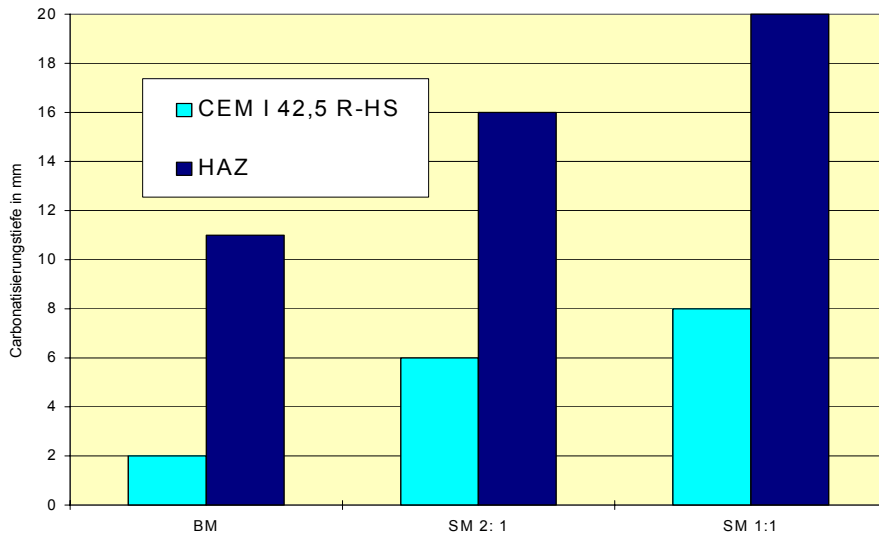
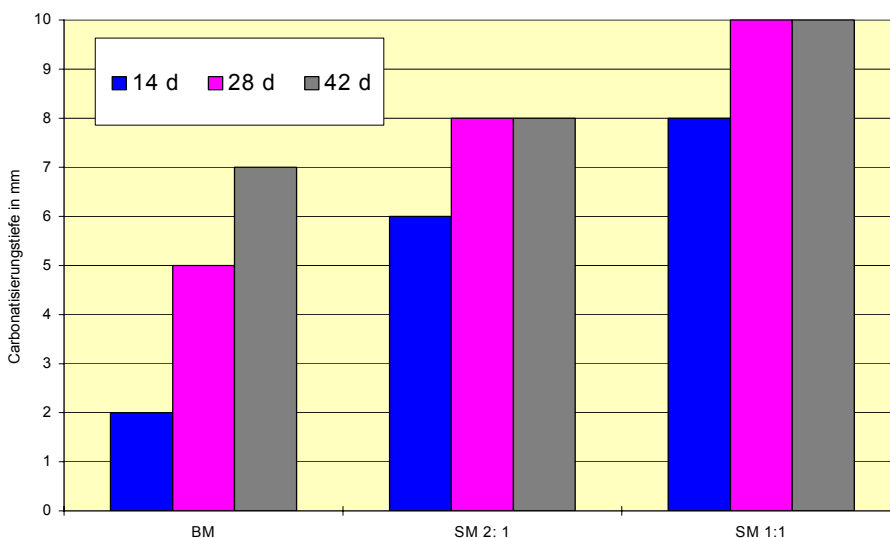


Bild 89: Carbonatisierungstiefe der Prüfkörper aus CEM I 42,5 R-HS in Abhängigkeit von der CO₂-Lagerung (1Vol% CO₂)



Bei den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen am HAZ ohne und mit Schaum nach der Carbonatisierung zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede in der Gefügeausbildung gegenüber den bei 10/85 gelagerten Proben (siehe 4.6.2.3). Vereinzelt sind in den Poren, aber auch in den Matrixbereichen nadelförmige Calcitkristalle nachweisbar, die z.T. gemeinsam mit C-S-H-Phasen aus einer Matrix aus gelförmigen Mg-Al-Ca-Si-S-Hydratphasen in Richtung des Poreninneren wachsen.

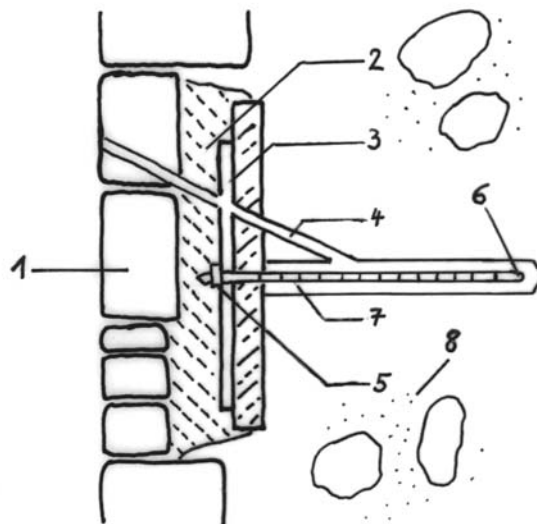
Der bei der Hydrolyse der Calciumsilicate abgespaltete Portlandit sowie die Hydratphasen in der Bindemittelmatrix der herkömmlichen Injektionsmörteln und Schaummörtel können nur carbonatisieren, wenn sie von außen für die CO₂-haltige Umgebungsluft frei zugänglich sind und klimatische Bedingungen vorherrschen, die die Carbonatisierung fördern, d.h. hohe Temperaturen (> 20°C) und niedrige Luftfeuchten. Da die Injektionen in das Mauerwerksinnere eine geschlossene Außenschale

voraussetzen, ist nicht mit Luftaustausch und damit nicht mit neuer CO₂-Zufuhr zu rechnen. Zusätzlich vermindern die im Mauerwerksinneren vorherrschenden Klimabedingungen (tiefere Temperaturen und hohe Feuchten) die Carbonatisierungsgefahr der Injektionsmörtel und -schaummörtel.

Im Bereich der Verpreßkanäle für Nadeln bzw. Anker ist je nach Gestaltung der Verankerung (Bild 90) ein stärkerer Luftzutritt zu erwarten. Auch werden sich die Klimaverhältnisse kurz unterhalb der Mauerwerksoberfläche (je nach Dicke des Verblendmauerwerkes) schneller dem Außenklima angleichen, so daß hier ggf. mit einer etwas stärkeren Carbonatisierung des Verpreßmörtels sowie des Hinterfüllmaterials verbunden mit einer Reduzierung des pH-Wertes gerechnet werden muß. Deshalb sollten zur Vermeidung von Korrosionsschäden bei Verwendung von HAZ-Injektionsmörteln und/oder -schaummörteln aber auch bei Schaummörteln auf PZ-Basis die Anker in nichtrostendem Stahl oder mit einem Korrosionsschutz versehen ausgeführt werden.

Bild 90: Schematische Darstellung der Mauerwerksanbindung durch eine einseitige Kopfplatte

1	Verblendmauerwerk	2	Hinterfüllmaterial
3	Kopfplatte	4	Verpreßkanal
5	Spannmutter	6	Verspannanker
7	Verpreßmörtel	8	Mauerkern



4.7 Festmörteleigenschaften im Verbund

Zur Beurteilung des Haftverbundes zwischen den Injektionsmörteln mit und ohne Schaum mit den Natursteinen und Ziegeln wurden die Prüfkörper (Laborprüfkörper und Bohrkernmaterial aus Versuchsinjektionen) visuell begutachtet, die Haftzugfestigkeiten und Bruchbilder bewertet sowie mikroskopische Untersuchungen der Phasengrenzflächen herangezogen.

4.7.1 Charakterisierung der Einsatzstoffe für die Verbunduntersuchungen

Natursteine

Für die Verbunduntersuchung der Injektionsmörtel ohne und mit Schaum mit Natursteinen wurden vier verschiedene, bei historischen Sakral- und Profanbauten in Thüringen häufig verwendete Natursteine ausgewählt: ein Sandstein, ein Gipsstein, ein Travertin und ein dichter Kalkstein. Es handelt sich dabei im Sinne der Natursteinverwitterung um reaktive Gesteine, d.h. Gesteine, die durch Reaktionen mit der Atmosphäre und/oder angrenzenden mineralischen Baustoffen, z.B. Mörteln, in Gegenwart von Feuchtigkeit Reaktionskrusten bzw. -säume bilden können.

Die verwendeten Natursteine sind Ausbaumaterial aus dem Mauerwerk der Runneburg in Weißensee/Thüringen. Sie werden im folgenden petrografisch beschrieben.

Als Bindemittel wurden die unter Punkt 4.4 beschriebenen Zemente CEM I 42.5 R, CEM I 42.5 R-HS, CEM III/B 32.5 -NW/HS und der HAZ verwendet. Zusätzlich wurde zu Vergleichszwecken ein handelsüblicher, traßhaltiger Verpreßmörtel für gipshaltiges Mauerwerk (Werkrockenmörtel gemäß DIN 18557 [A6]) eingesetzt. Nach [36] weist das Bindemittel des unter der Handelsbezeichnung Tubag vertriebenen Mörtels folgende Zusammensetzung auf: ca. 50 % Hüttensand oder HOZ, ca. 15 % PZ oder PZ-Klinker, ca. 17,5 % Flugasche und ca. 17,5 % Traß.

Gipsstein (GS): Keuper- Gipsstein

Vorkommen: Raum Erfurt - Sömmerda

Farbe: weiß

massiges Gefüge, keine Schichtung erkennbar

relativ rein, keine farblichen Unterschiede

primär angelegte Unstetigkeiten durch Sedimentation

(mindern mechanische Beanspruchbarkeit)

Sandstein (SS): vermutlich Sandsteinhorizont aus dem Unteren Keuper (Schilfsandstein)

Vorkommen: Raum Sömmerda

Farbe: rotbraun

fein- und gleichkörnig, Korngröße 0,1 ... 0,2 mm

deutliche Feinschichtung (eben und schräg) bedingt durch Farbwechsel

Bindemittel: kieselig, ferritisch

mit Lupe Glimmer erkennbar (heller Glimmer = Muscovit)

Dichter Kalkstein/

Muschelkalk: Oberer Muschelkalk, aus relativ fester Werksteinbank

(MK) Vorkommen: Thüringen

Farbe: grau

relativ dichtes Gefüge mit schichtweise eingelagerten Fossilresten

Travertin (TR): Vorkommen: Thüringen, genauere Herkunft unbekannt

Farbe: dunkelgelb, ocker

mittlere Porosität

Inkrustationen von Mollusken und pflanzlichen Resten mit dem Auge erkennbar

Die chemische Zusammensetzung sowie den röntgenografischen Phasenbestand der Natursteine zeigt Tabelle A1 im Anhang. In Tabelle A2 im Anhang sind die wichtigsten gesteintechnischen Kennwerte der Natursteine im Vergleich zu Literaturangaben [A12], [50] dargestellt.

Ziegel

Für die Verbunduntersuchungen mit Ziegeln wurden 2 handelsübliche, normalformatige Ziegel DIN 105 [A 13] Mz 8-1,6-NF und VMz 28-1,8-NF verwendet. Die wichtigsten Kennwerte der Ziegel nach Freyburg [13] zeigt die Tabelle A3 im Anhang.

4.7.2 Bestimmung der Haftzugfestigkeit

4.7.2.1 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Zur Prüfung der Haftzugfestigkeit wurden Verbundprismen der Abmessung $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ hergestellt, indem Naturstein- bzw. Ziegelquader der Abmessung $4 \cdot 4 \cdot 2 \text{ cm}^3$ mit zwei bruchfrischen Stirnseiten in die Prismenformen gemäß DIN 1164-1 eingelegt wurden. Anschließend wurde der Injektionsmörtel eingefüllt. Die bei 20/65 vorgelagerten Natursteine wurden vor dem Einfüllen des Injektionsmörtels nicht vorgeätzt. Für die Verbunduntersuchungen mit den Ziegeln wurden die Ziegelquader einer Prüfserie nur befeuchtet und für eine zweite Prüfserie unter Wasser vorgelagert. Nach 28- bzw. 56tägiger Lagerung (nur Verpreßmörtel) im Normalklima oder im Klima 10/85 wurden an den Stirnseiten der Verbundprismen mit einem Epoxidharzkleber (Harz T19-32, Härter H10-58, Leuna Harze AG) Stahlwinkel aufgeklebt und die Prüfkörper auf axiale Zugfestigkeit geprüft (Bild 91).

Bild 91: Verbundprisma mit eingebettetem Naturstein während der Prüfung



4.7.2.2 Verbund zu Natursteinen

Die Ergebnisse der Haftzugprüfungen an den Verbundprismen mit Natursteinen zeigt Tabelle 48.

Tabelle 48: Haftzugfestigkeiten zwischen Injektionsmörteln (28 d bzw. 56 d) und Natursteinen

Haftzugfestigkeit in N/mm ² und Bruchbild				
	Gipsstein	Sandstein	Travertin	Muschelkalk
CEM I 42.5 R-HS				
BM _{pur}	0,5 a	0,5 b	1,1 b	0,9 a
	0,6 b		0,8 c	1,0 c
SM	0,3 a	0,5 a	0,4 c	0,3 c
	0,3 c	0,3 c		
CEM I 42.5 R				
BM _{pur}	0,5 a	0,4 b	0,8 b	0,7 a
	0,3 b		1,0 c	
SM	0,3 a	0,4 b	0,4 c	0,2 c
	0,3 c	0,3 c		
CEM III/B 32.5 NW/HS				
BM _{pur}	0,3 a	0,5 b	0,5 c	0,4 a
SM	0,1 a	0,2 c	0,4 c	0,3 c

Haftzugfestigkeit in N/mm ² und Bruchbild				
	Gipsstein	Sandstein	Travertin	Muschelkalk
HAZ				
BM _{pur}	1,3 a	0,4 b	1,2 c	1,0 a
	1,0 b			1,3 c
SM	0,6 c	0,3 c	0,6 c	0,7 c
Verpreßmörtel				
pur	0,04 a	0,4 b	0,7 c	0,5 a
SM	0,04 a	0,3 a	0,2 c	0,3 c
		0,4 c		

a ... Adhäsionsbruch

b ... Kohäsionsbruch im Naturstein (Wert entspricht der Zugfestigkeit des Steines an dieser Stelle)

c ... Kohäsionsbruch im Mörtel (Wert entspricht der Zugfestigkeit des Mörtels an dieser Stelle)

Die Haftzugfestigkeiten aller Verbundvariationen ohne und mit Schaum sind mit Werten zwischen 0,3 und 1,3 N/mm² als gut zu bewerten, wobei kein Bruchbild generell dominierte. Ausgenommen davon ist der Verbund zwischen dem Gipsstein und dem traßhaltigen Verpreßmörtel. Hierbei traten bei unzureichenden Haftzugfestigkeiten < 0,1 N/mm² nur Adhäsionsbrüche auf.

Die intensivste Verzahnung aller Bindemittel bzw. Schaummörtel trat in Verbindung mit dem Travertin auf, was auf dessen große Oberflächenrauigkeit zurückgeführt wird. Die mikroskopischen Untersuchungen bestätigen die positiven Ergebnisse der Haftzugprüfungen. Die Bilder 92 und 93 zeigen in 8facher Vergrößerung beispielhaft den Kontakt zwischen dem erhärteten HAZ und HAZ-Schaummörtel und Muschelkalk. Der verfestigte HAZ ohne Schaum weist ein sehr dichtes Gefüge mit vereinzelt auftretenden großen Verdichtungsporen auf (Durchmesser zwischen 0,5 und 1 mm). Beim HAZ-Schaummörtel sind die Luftporen mit Durchmessern zwischen 20 µm und 0,5 mm gleichmäßig verteilt. Bei beiden Varianten ist ein nahtloser Verbund zwischen Mörtel und Gestein festzustellen.

Bild 92: Verbund zwischen HAZ und Muschelkalk (Maßstabsbalken = 2 mm)

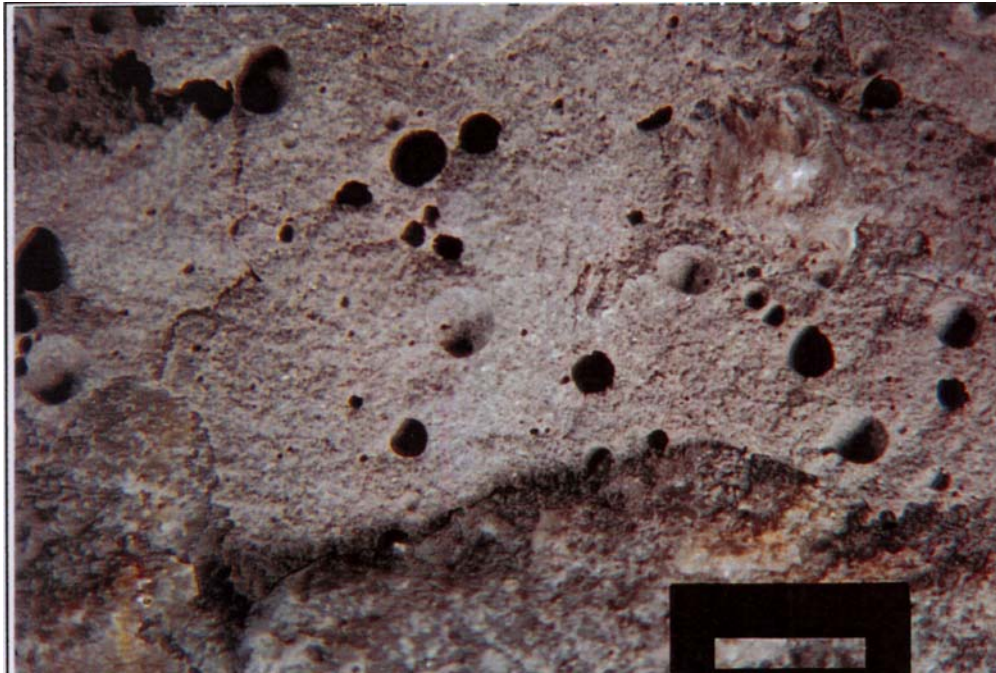
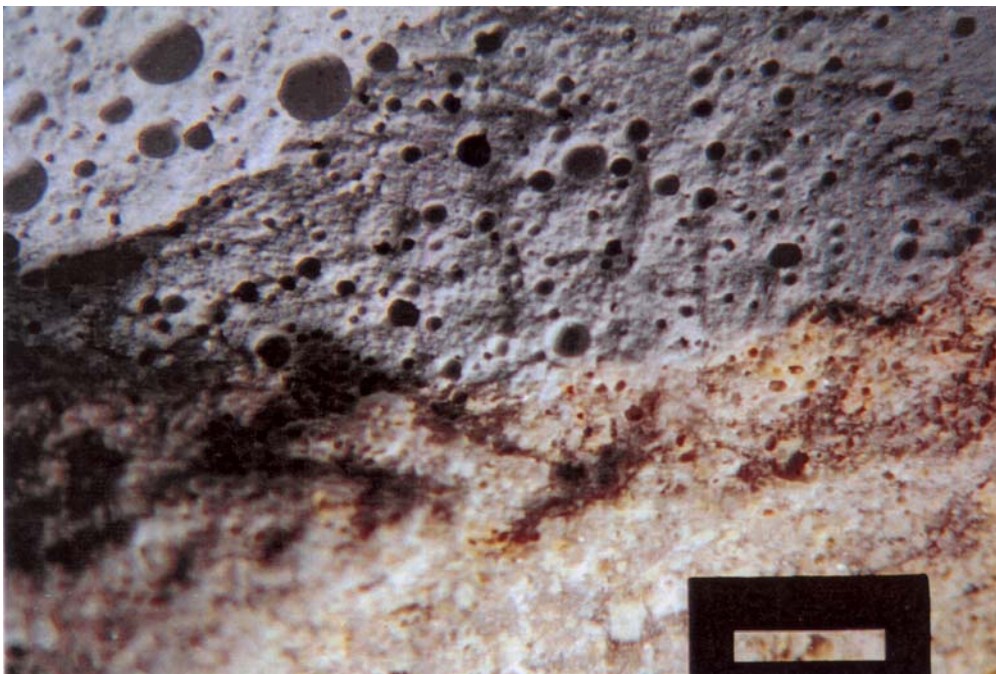


Bild 93: Verbund zwischen HAZ-Schaummörtel und Muschelkalk
(Maßstabsbalken = 2 mm)



4.7.2.3 Verbund zu Ziegeln

Die Ergebnisse der Haftzugprüfungen an den Verbundprismen mit dem Ziegel Mz 8-1,6-NF zeigt Tabelle 49.

Tabelle 49: Haftzugfestigkeiten zwischen Injektionsmörteln (28 d bzw. 56 d) und Mz 8-1,6-NF

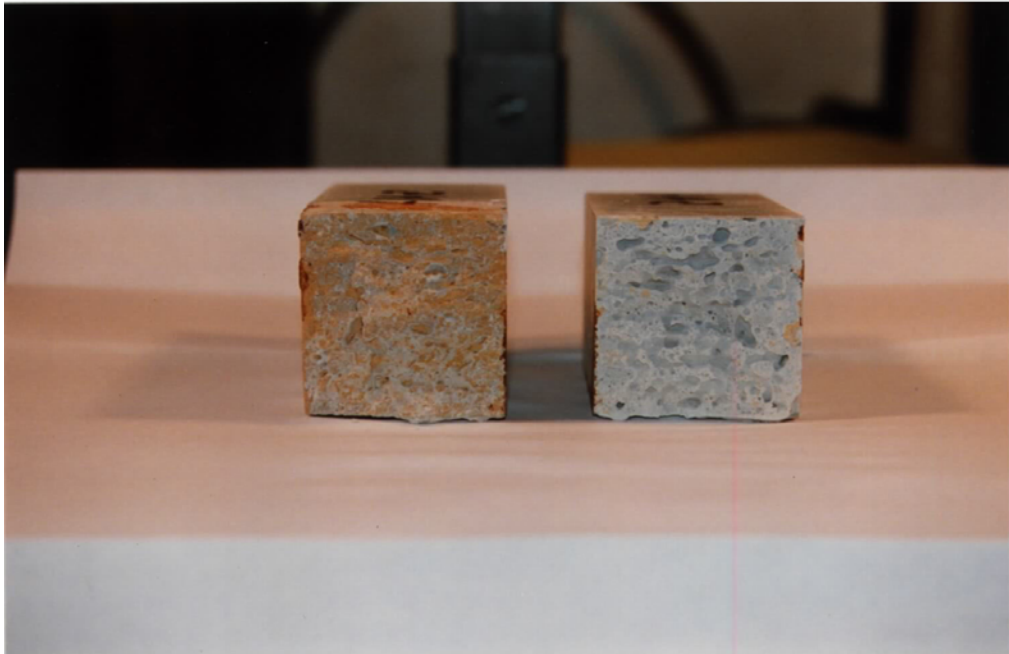
Haftzugfestigkeit in N/mm ² und Bruchbild				
Verbundkörper: Ziegelquader:	Lagerung 20/65 befeuchtet	Lagerung 20/65 getaucht	Lagerung 10/85 befeuchtet	Lagerung 10/85 getaucht
CEM I 42.5 R-HS				
BM _{pur}	-	0,33 b	n.b.	0,54 b
SM	-	0,46 c	n.b.	0,46 b
CEM I 42.5 R				
BM _{pur}	0,01 a	n.b.	0,08 a	n.b.
SM	0,26 a	n.b.	0,06 a	n.b.
CEM III/B 32.5 NW/HS				
BM _{pur}	0,04 a	n.b.	0,10 a	n.b.
SM	0,04 a	n.b.	0,06 a	n.b.
HAZ				
BM _{pur}	0,04 a	0,08 a	-	0,31 a
SM	-	0,12 a	-	0,34 a
Verpreßmörtel				
pur	-	0,06 a	0,21 a	0,38 a

a ... Adhäsionsbruch b ... Kohäsionsbruch im Ziegel
c ... Kohäsionsbruch im Mörtel

Während bei den Bindemittel-Naturstein-Kombinationen auf das Vornässen verzichtet werden konnte, kam zwischen den trockenen Ziegeln (Vorlagerung 20/65) und den verschiedenen Bindemittelleimen und Schaummörteln trotz Zugabe des Stabilisierers zur Erhöhung des Wasserrückhaltevermögens kein Verbund zustande. Den Mörteln wurde beim Kontakt zu dem sehr stark saugenden Ziegelmaterial (kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient = 19,7 kg/m²h^{1/2}) zuviel Wasser entzogen, so daß die Bindemittelhydratation an der Phasengrenzfläche nicht in ausreichendem Umfang stattfinden konnte. Diese Form der chemischen Bindung ist neben der rein physikalischen Anbindung durch Verzahnung, Kapillarkräfte und Brückenbildung [35] ebenfalls notwendig, um einen dauerhaften Haftverbund zu erreichen. Bild 94 zeigt beispielhaft die Probe HAZ mit Mz 8-1,6-NF, die nach dem Entschalen als Einzelstücke vorlagen. Auf der linken Bildhälfte ist das Ziegelstück mit Teilen des verfestigten Bindemittelleimes zu sehen. Das zeugt von einem intensiven Kapillartransport in Richtung des Ziegels, wobei Bindemittelpartikel mit transportiert wurden, die kurz unter oder direkt an der Ziegeloberfläche hydratisierten und karbonatisierten. Die rechte

Bildhälfte zeigt den erhärteten HAZ. Bereits mit bloßem Auge sind Bereiche unterschiedlicher Porosität erkennbar, was auf die während des Kontaktes zum Ziegel entstehenden, örtlich variierenden Wasser-Bindemittel-Werte zurückzuführen ist.

Bild 94: Nach dem Entschalen des Verbundkörpers aus HAZ mit Mz 8-1,6-NF



Auch nach dem Befeuchten der Ziegeloberflächen ist der Haftverbund bei den im Klima 20/65 gelagerten Verbundkörpern mit Haftzugfestigkeiten $\leq 0,04 \text{ N/mm}^2$ bei reinen Adhäsionsbrüchen unzureichend (Ausnahme: Kombination mit Schaummörtel aus C_3A -reichem PZ). Bei den im Klima 10/85 gelagerten Verbundkörpern liegen die Haftzugfestigkeiten geringfügig höher. Sie sind - die Kombination mit dem Verpreßmörtel ausgenommen - jedoch ebenfalls als unzureichend zu bewerten.

Erst nach dem Tauchen der Ziegelstücke vor dem Einbringen des Mörtels sind baupraktisch akzeptable Haftzugfestigkeiten zu erreichen. Während sich die Lagerungsart bei hochsulfatwiderstandsfähigen PZ nur geringfügig auf die Haftzugfestigkeiten auswirkt, zeigt sich beim HAZ und dem traßhaltigen Verpreßmörtel eine deutliche Abhängigkeit der Haftzugfestigkeit von der Lagerungsfeuchte. Die Haftzugfestigkeiten der im Klima 10/85 gelagerten Proben sind beim erhärteten Bindemittel als auch beim Schaummörtel 3 bis 4fach größer als die der im Klima 20/65 gelagerten Proben. Das ist einerseits auf den höheren Hydratationsgrad und andererseits auf die geringere Schwindneigung der Bindemittel bei höherer Luftfeuchte zurückzuführen.

4.7.3 Verbunduntersuchungen an Modellmauern

4.7.3.1 Herstellung der Modellmauern und Versuchsinjektionen

Ziegelmodellmauer

Als Modell für die Versuchsinjektionen in Ziegelmauerwerk wurde ein sogenanntes „Aquarium“ verwendet. Dabei handelt es sich um einen transportablen Stahlrahmen mit quadratischem Grundriß ($a = 0,48 \text{ m}$), in den an allen 4 Seiten durchsichtige Acrylglasplatten eingeschoben werden. Die Acrylglasscheiben sind mit Bohrlöchern für die Packer versehen. Auf die Grundplatte des „Aquariums“ wurden vor dem Einschoben der Acrylglasplatten zwei Ziegelmauern an zwei gegenüberliegenden Seiten errichtet (Läuferverband, Breite = 2 NF-Ziegel, Höhe = 5 NF-Ziegel, Tiefe = 7,1 cm). Das Innere wurde unregelmäßig mit Ziegelhälften und -viertelstücken gefüllt. Im Gegensatz zu den Untersuchungen an den Verbundprismen, bei denen ein sehr stark saugender Ziegel niedrigerer Rohdichteklasse (Hintermauerqualität) verwendet wurde, wurde die Modellmauer aus Ziegeln VMz 28-1,8-NF gemäß DIN 105 mit niedrigerem kapillarem Wasseraufnahmekoeffizienten ($\omega = 9,3 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{1/2}$) errichtet. Der Mauermörtel bestand aus Zement (CEM I 42,5 R-HS), Weißkalkhydrat (CL 90 gemäß DIN 1060 [A 13]) und Bausand (Raumanteile gemäß DIN 1053 MG IIa [A 4]).

Mittels dieser Bauweise der Modellmauer ist es nicht nur möglich, den Haftverbund an einer Vielzahl von Kontaktflächen zu beschreiben, sondern auch den Verlauf des Mörtels während der Injektion (Penetration und Fließverhalten) und die Hohlräumausfüllung insgesamt. Die Modellmauer wurde über Packer (Plastikrohr) mit HAZ-Schaummörtel injiziert (W/B = 0,5; BML:SM = 2:1). Bild 95 zeigt das „Aquarium“ nach der Injektion von HAZ-Schaummörtel. Die Lagerung des „Aquariums“ erfolgte bei 20°C und 65 % r.F. Nach 28 Tagen wurden die Acrylglasscheiben entfernt und die Modellmauer beprobt.

Natursteinmodellmauer

Orientierende Untersuchungen zur Wirksamkeit von Injektionen und zum Haftverbund der Injektionsmörtel mit verschiedenen Natursteinen erfolgten an einer dreischaligen Travertinmodellmauer mit den Abmessungen 2,60 · 0,60 · 1,0 m³ auf dem Hofgelände des FIB Weimar. Als Schüttkern wurden Kalksteinschotter (32/63 mm) und Travertinbruchstücke verwendet. Das Mauerwerksinnere wurde in 4 Kammern (CEM I 42,5 R-HS, HAZ, HGZ = Hüttensand-Gips-Zement) unterteilt, von denen 3 Kammern mit Schaummörteln unterschiedlicher Bindemittelbasis aber mit gleichem Schaumanteil (BML:SM=2:1) und eine Kammer mit Bindemittelleim injiziert wurden. Zur Untersuchung des Haftverbundes zwischen den Injektionsmörteln und dem Schotter sowie zwischen dem Injektionsmörtel und der Maueraußenschale (Travertin) wurden die Kammern nach 28 Tagen freier Bewitterung ausgebohrt. Bild 96 zeigt die Versuchsmauer mit den Bohrkernen.

Bild 95: Ziegelmodellmauer nach der Injektion von HAZ-Schaummörtel



Bild 96: Natursteinmodellmauer mit Bohrkernen



4.7.3.2 Beschreibung des Haftverbundes anhand von Bohrkernen

Aus der Ziegelversuchsmauer wurde ein Bohrkern mit einem Durchmesser von $\varnothing = 15$ cm gezogen (Bild 97). Dieser wurde so zersägt, daß ausreichend große Kontaktflächen zwischen Mauerziegel und HAZ-ISM für die Prüfung der Haftzugfestigkeit vorhanden waren. Der gute Haftverbund zwischen den Ziegeln, dem Mauermörtel und dem Injektionsmörtel zeigte sich bereits während der Bohrkernentnahme. Die erreichte Mauerwerksfestigkeit war so groß, daß der Bohrkern in sich stabil war. Die Hohlräumeausfüllung mit HAZ-Schaummörtel lag bei ca. 85 Vol% (Bild 98). Die Haftzugfestigkeit lag im Mittel bei $0,89 \text{ N/mm}^2$ (Mischbruch: ca. 60 % Adhäsionsbruch, ca. 40 % Kohäsionsbruch im HAZ-Schaummörtel). Auch die lichtmikroskopischen Untersuchungen belegen den sehr guten Haftverbund. Bild 99 zeigt eine Kontaktfläche in 8facher Vergrößerung.

Bild 97: Ziegelmodellmauer nach der Bohrkernentnahme



Bild 98: Bohrkern aus der Ziegelmodellmauer



Bild 99: Kontaktfläche zwischen dem VMz 28-1,8-NF und HAZ-ISM

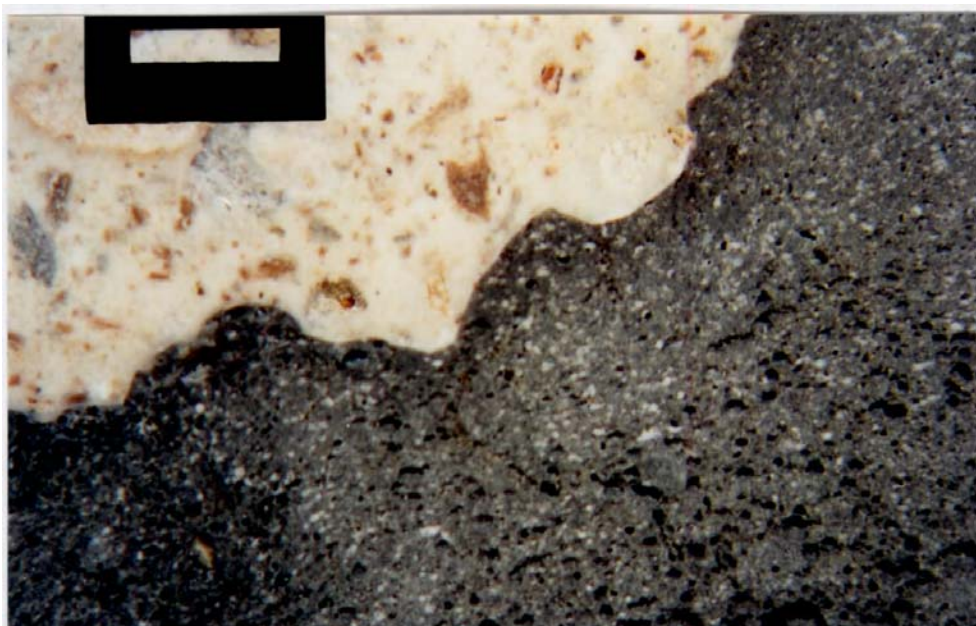


Bild 100 zeigt einen Bohrkern aus Travertinbruchstücken und HAZ-Schaummörtel, der der Natursteinversuchsmauer entnommen wurde (siehe Bild 96). Bei dem Riß in der Bildmitte handelt es sich um eine Sollbruchstelle, die aufgrund des hohen Eigengewichts des Bohrkernes bei der Entnahme entstand. Wie bereits unter 4.7.2.2 festgestellt wurde, kommt beim Kontakt der Schaummörtel unterschiedlicher Bindemittelbasis zum Travertin ein sehr guter Haftverbund zustande (siehe auch Bild 101 in 8facher Vergrößerung). Die Hohlräumeausfllung der Natursteinmodellmauer mit HAZ-Schaummörtel lag bei ca. 95 Vol%.

Bild 100: Bohrkern aus der Natursteinmodellmauer



Bild 101: Kontaktfläche zwischen Travertin und ISM (CEM I 42,5 R-HS)
(Maßstabsbalken = 2 mm)



4.7.4 Zusammenfassung

Aus den Verbunduntersuchungen können folgende Schlußfolgerungen für den Injektionsablauf gezogen werden: bei Injektionen mit Schaummörtel in Natursteinmauerwerk aus Kalkstein verschiedener Varitäten sowie Gips-/Anhydritstein ist es nicht erforderlich vorzunässen, d.h. vor dem Injizieren Wasser ins Mauerwerk zu pumpen. Bei Sandsteinmauerwerk sollte in Abhängigkeit von der Porenverteilung und der kapillaren Wasseraufnahme der jeweiligen Sandsteinvarität und der vorhandenen Mauerwerksfeuchte insgesamt entschieden werden, ob ein Vornässen erforderlich ist oder nicht. Zur Entscheidungsfindung reicht i.A. die Prüfung mittels Karstenscher Röhren aus.

Bei den Ziegeln hängt diese Entscheidung ebenfalls vom Porenvolumen (Rohdichte und offene Porosität), von der kapillaren Wasseraufnahme, dem Feuchtezustand des vorhandenen Ziegelmauerwerks und der Gesamtmauerwerksstärke ab. Bei Injektionen in trockenes Ziegelmauerwerk aus Mauerziegeln oder Vormauerziegeln ist das Vornässen auch bei Verwendung von Injektionsschaummörtel unerläßlich. Nach Fichtner [9] wirkt sich neben der Erhöhung des W/B-Wertes des Injektionsmörtels auch das Vornässen des Ziegelmauerwerkes günstig auf die Reichweite des Injektionsmörtels im Mauerwerk aus.

Da die historischen Mauerwerke aufgrund fehlender Sperrung und häufiger Salzbelastung jedoch überwiegend hohe Feuchten (ca. 80 % bis 95 %, siehe auch [14]) und damit hohe Porenfüllungsgrade aufweisen, sollte in Abhängigkeit von den konkreten Objektbedingungen entschieden werden, ob ein Vornässen erforderlich ist oder nicht.

5 Verträglichkeitsuntersuchungen unterschiedlicher Bindemittel mit bauschädlichen Salzen

Da die komplexen Ursachen der Schädigung historischer Bausubstanz nicht in jedem Fall ausreichend geklärt wurden, haben häufig unsachgemäße Sanierungsmaßnahmen durch die unangepasste Kombination historischer, z.T. fremdsalzbelasteter Mörtel mit modernen Baustoffen Sekundärschäden verursacht. Anstelle der angestrebten Bauwerksstabilisierung traten zusätzliche Belastungen durch stoffliche Unverträglichkeit. Als Beispiele sind hierbei die Kirche in Hollern und die Runneburg in Weißensee zu nennen. Daß es aber auch bei sorgfältiger Auswahl der Sanierbaustoffe aufgrund extremer Bedingungen am Objekt (z.B. extreme Feuchtebelastung des gesamten Bauwerkes nach Löscharbeiten, siehe Tabelle 2, S.25) zu erneuten Schäden kommen kann, zeigt das Beispiel der Johanniskirche in Ellrich.

Besonders gefährdet sind dabei gipshaltige Bauwerke, wobei der Gips und z.T. auch Anhydrit als Mauerstein, Mörtelbindemittel und Mörtelzuschlag auftreten können. Auch durch die nachträgliche Vergipsung kalkhaltiger Baustoffe (Mörtel und reaktionsfähige Natursteine) können je nach Exposition des Bauwerks nicht zu vernachlässigende Mengen an Gips eingetragen worden sein.

Die in derartigen Bauwerken entstandenen Risse versuchte man anfangs durch Injektion von - damals als vollkommen ungefährlich angesehenen - sulfatwiderstandsfähigen Zementen, die für den äußeren Sulfateinfluß auf Beton entwickelt wurden, zu sanieren. Auch die heutige Zementspezifikation HS (hochsulfatwiderstandsfähig) nach DIN 1164-1 [A11] bezieht sich nur auf erhärtete Betone nach DIN 1045 [A19], die einem Sulfatangriff von außen durch sulfathaltige Wässer, Böden oder Gase gemäß DIN 4030 [A20] ausgesetzt sind. Die Sanierungspraxis zeigte aber, daß es auch beim Einsatz von eisenreichen, C₃A-armen Zementen zur Treibmineralbildung kommen kann. In diesen Fällen wurde nicht berücksichtigt, daß der äußere Sulfatangriff nicht mit dem inneren Angriff von Sulfat, d.h. den Reaktionen an der Phasengrenzfläche zwischen dem feuchten Gips im Mauerwerk und dem frisch eingebrachten Injektionsgut, gleichzusetzen ist und daß nicht nur die Aluminate der Zemente (einschließlich der HS-Zemente), sondern auch aller anderen hydraulisch erhärtenden Bindemittel (z.B. hydraulischer Kalke) und mobile Al₂O₃-haltige Komponenten zur Bildung von Treibmineralien führen können.

Daher bestand Handlungsbedarf sowohl für die Entwicklung von Bindemitteln bzw. Mörteln für die Sanierung von sulfathaltigen Bauwerken als auch für die Entwicklung geeigneter Prüfverfahren und Bewertungsmaßstäbe für die Verträglichkeit derartiger Sanierbaustoffe mit den salzbelasteten, insbesondere sulfatbelasteten historischen Baustoffen.

Einen maßgeblichen Beitrag zur Bindemittelentwicklung leistete Ludwig [26] in Verbindung mit den Schäden an verschiedenen norddeutschen Kirchenbauten im Raum Hannover. Er untersuchte, welche Möglichkeiten sich aus der Kombination natürlicher und künstlicher Puzzolane mit Hüttensand und Kalkhydrat oder Ca(OH)₂-abspaltendem PZ-Klinker ergeben. Dabei erwies sich die Verbindung von Hochofenzement mit einem

bestimmten Gehalt an rheinischem Traß als geeignet. Mörtel auf dieser Basis wird als „Restaurierungsmörtel für gipshaltiges Mauerwerk“ in drei Ausführungen im Handel angeboten.

Ähnliche Überlegungen stellte bereits Rüth an - zitiert in [20], in dem er bei Sanierungsarbeiten an gipshaltigem Mauerwerk zur Erhöhung der Sulfatbeständigkeit des Erzzementes amorphe Kieselsäure (Sika Ib) verwendete (siehe Tabelle 3).

Auch Schwick und Diedrichs [48] bestätigen, daß die Zugabe von löslicher Kieselsäure weitgehend die Treibreaktionen auslösende Ettringit- und Thaumazitbildung verhindert, was anhand von Langzeitdehnungsverhalten verschiedener Mischungen aus Gips und handelsüblichen HS-Zementen unter Zugabe von Silicastaub untersucht wurde.

Wischers und Sprung [77] beschrieben die sulfatwiderstandsverbessernden Eigenschaften reaktiver und kalkarmer Flugaschen, die sowohl auf physikalischen als auch auf chemischen Wirkungen der Flugaschen auf den Mörtel oder Beton beruhen. Durch die Flugasche nehmen die Dichtigkeit und damit der Diffusionswiderstand der Bindemittelmatrix gegen das Eindringen von Sulfationen zu. Darüber hinaus wird durch die reaktive Flugasche bei der puzzolanischen Reaktion Ca(OH)_2 gebunden, wodurch der Ca(OH)_2 -Gehalt absinkt und auf diese Weise die Ettringitbildung behindert wird.

Einen weiteren Beitrag leisteten Knöfel und Mitarbeiter [22] sowie Sattler [45] mit der Entwicklung eines gipsverträglichen Bindemittels auf der Basis von Hüttensand, Sulfatträger (Anhydrit oder Gips) und Portlandzement (HAZ bzw. HGZ) in Anlehnung an den früher hergestellten Sulfathüttenzement (genormt in DIN 4210 [A5]).

Da die stoffliche Unverträglichkeit häufig erst nach längerer Zeit (nach [69] z.B. nach 3 Jahren) in Erscheinung tritt, ist es notwendig, ein Prüfverfahren zu nutzen, mit dem die Gefahr einer möglichen Treibmineralbildung möglichst zeitig erkannt werden kann und daraus abgeleitet entsprechende Vorbeugungsmaßnahmen getroffen werden können. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß bei den unterschiedlichen Angriffen eine kontinuierliche Veränderung der stofflichen und Gefügeeigenschaften nur in Ausnahmefällen zu erwarten ist. Vielmehr muß damit gerechnet werden, daß nach bestimmten Prüfzeiträumen scheinbarer Wirkungslosigkeit schlagartig Schädigungen auftreten. Das ist damit zu begründen, daß sich die Poren allmählich füllen, was mit einer Zunahme der Druckfestigkeit verbunden sein kann, und erst dann Schäden entstehen, wenn kein Raum für Phasenneubildung mehr vorhanden ist.

Die Extrapolation der Laborergebnisse auf das Langzeitverhalten unter Praxisbedingungen ist sehr schwierig. Trotzdem können Laborprüfungen wichtige Hinweise für eine relative Beurteilung liefern.

Für die Prüfung der stofflichen Verträglichkeit existiert - ähnlich wie für die Prüfung des Sulfatwiderstandes und des Widerstandes gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion - in Deutschland kein Normverfahren und kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren.

Jedes Prüfverfahren stellt eine Konvention dar, deren Inhalt und Ausführung niemals vollkommen den Praxisbedingungen entsprechen. Dennoch sind an das Prüfverfahren bestimmte Anforderungen zu stellen. Dazu gehören eine leichte Handhabung, eine gute Reproduzierbarkeit sowie ein möglichst geringer Zeit-, Arbeits- und Geräteaufwand.

Darüber hinaus sollen - wie bereits erwähnt - die Ergebnisse nach relativ kurzer Prüfdauer vorliegen, weshalb der Angriffsgrad überhöht werden muß.

Das kann einerseits durch Schaffung einer Vielzahl von Kontaktflächen zwischen den zu testenden Baustoffsystemen erfolgen, d.h. die reagierenden Komponenten sollten so wenig als möglich „verdünnt“ werden. Deshalb wurden bei den Versuchen keine zuschlaghaltigen Mörtel verwendet, sondern Bindemittelleime und Schaummörtel. Zum anderen sollten bestimmte Randbedingungen geschaffen werden, die die Bildung der schädigenden Reaktionsprodukte fördern, d.h. u.a. Lagerung bei niedrigen Temperaturen und hohen Feuchten.

Zur Untersuchung des Einflusses des Porenraumes auf die Verträglichkeit der Bindemittel mit den Salzen wurden die verfestigten Bindemittel mit geringem Luftporengehalt wie bei herkömmlichen Injektionen und die Schaummörtel betrachtet.

5.1 Innerer Angriff

5.1.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Bei den durchgeführten Untersuchungen wird als Maß für die Verträglichkeit zwischen den Bindemitteln und Salzen die Längenänderung bzw. Dehnung ermittelt, die sich beim Kontakt beider Systeme einstellt, der Verlauf der Dehnung über den Prüfzeitraum sowie die äußere Beschaffenheit der Prüfkörper nach bestimmten Prüfzeiträumen. Zusätzlich wurde die Masseänderung erfaßt. Bei starken Dehnungen wurde jeweils von einem Prisma der Prüfserie ein Bruchstück entnommen, was nach schonender Trocknung bei

40 °C zerkleinert und anschließend $< 63 \mu\text{m}$ abgesiebt wurde. Daran schlossen sich röntgendiffraktometrische und differenzthermoanalytische Untersuchungen zur Klärung der Dehnungsursache.

Für die Untersuchung des Einflusses der Salze auf die Bindemittel wurde ein innerer Angriff simuliert, d.h. die Salze wurden mit Gehalten von 10 % bezogen auf die Bindemittelleinwaage im Mörtelanmachwasser gelöst. Salzgehalte in dieser Größenordnung wurden an historischen Gebäuden durchaus nachgewiesen. Der simulierte Angriffsmechanismus tritt in der Sanierungspraxis beispielsweise ein, wenn Salze auf Baustoffoberflächen, z.B. Natursteinflanken, beim Kontakt mit frischem Mörtel bei der Neuverfugung mittels Spritzverfahren oder Mauerwerksinjektionen gelöst und so in innigen Kontakt mit dem Mörtelbindemittel gebracht werden.

Die Erfassung der Längenänderung erfolgte in Anlehnung an die DIN 52450 [A3] sowie das Mörtelprüfverfahren nach [23]. Als Meßgerät diente das Meßgehänge A gemäß DIN 52450 Bild 7. Die Nullmessung erfolgte jeweils nach dem Ausschalen der Prüfkörper. Weitere Messungen folgten nach 7, 14, 21, 28, 56, 90, 180 und 270 Tagen, nach 1, 2, 3 und z.T. 4 Jahren.

5.1.2 Charakterisierung der verwendeten Salze

Als Vertreter für die große Gruppe der bauschädlichen Salze wurden Calciumsulfat, Magnesiumsulfat, Ammoniumnitrat, Kaliumnitrat und Natriumchlorid verwendet (Zusammensetzung und Mineralnamen siehe Tabelle 4).

Bei den Sulfaten und Nitraten wurden jeweils zwei unterschiedliche Salze in die Untersuchungen einbezogen, da das Gefährdungspotential der Salze nicht nur vom Anion, sondern auch von der Art des Kationes abhängen kann.

Bei der Verträglichkeitsprüfung wird nicht auf die Schädigungen durch Salze infolge ihrer Hygroskopizität und/oder ihrer Fähigkeit zu hydratisieren bzw. dehydratisieren sowie sich zu lösen bzw. zu rekristallisieren eingegangen (siehe Punkte 3.3 bis 3.5), sondern auf die Möglichkeit der Reaktionen von Salzionen mit bestimmten Komponenten der Mörtelbindemittel. Dabei entstehende Phasen können aufgrund von Volumenkontraktionen zur Zermürbung des Baustoffgefüges bis hin zu dessen Zerstörung führen. Am gefährdetsten sind dabei die Aluminate und dessen Hydrate der hydraulischen Bindemittel und Bindemittelkomponenten, die mobiles Al_2O_3 enthalten, da sie sowohl mit dem Sulfat (zu Ettringit, z.B. gemäß Gl.1), dem Nitrat (zu Tricalciummononitrathydrat, z.B. gemäß Gl.2) und mit dem Chlorid (zu Friedelschem Salz, z.B. gemäß Gl.3) reagieren können.

- (1) $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} + 26\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$
verbunden mit 8facher Volumenvergrößerung
- (2) $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
verbunden mit ?facher Volumenvergrößerung
- (3) $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaCl}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
verbunden mit 1,9facher Volumenvergrößerung

Calciumsulfat

Calciumsulfat kann als Dihydrat sowohl als Eigensalz verschiedener Baustoffe auftreten (z.B. Gips- bzw. Anhydritstein, Gipsmörtel, Anhydritestrich) als auch als Fremdsalz durch atmosphärische Belastung (SO_2 -haltige Luft) sowie Angriffe durch sulfathaltige Wässer, Böden oder Gase und biologische Vorgänge in den Baustoff eingetragen werden. Durch die starke Zunahme der SO_2 -Belastung der Luft in den letzten Jahrzehnten ist Gips in den Außenbereichen nahezu aller historischen Bauwerke aus kalkhaltigen Baustoffen nachweisbar.

Magnesiumsulfat

Magnesiumsulfat ist in seinen Hydratstufen häufig dort anzutreffen, wo Sulfate z.B. aus Gipsmörteln auf dolomit- oder ankerithaltige Baustoffe wie Graukalkmörtel oder Dolomitwerkstein in Gegenwart von Feuchtigkeit einwirken. Eine weitere Quelle können Ziegel sein, wobei das Magnesiumsulfat in diesem Fall durch den keramischen Brennprozeß entsteht und somit als Eigensalz des Ziegels anzusprechen ist. Aufgrund seiner guten Löslichkeit kann es jedoch durch Kapillartransport in die angrenzenden Bereiche eindringen.

Natriumchlorid

Demgegenüber sind die verstärkt in den Küstenregionen anzutreffenden Belastungen mit Natriumchlorid nur durch Fremdeintrag möglich. Als Quellen können hier atmosphärischer Eintrag, taumittelhaltiges Spritzwasser, chloridhaltiges Grund- oder Mörtelanmachwasser (z.B. Meerwasser) und Eintrag durch Absäuerungsmittel auf der Basis verdünnter Salzsäure, die zur Reinigung insbesondere von Ziegelsichtmauerwerk Verwendung finden, genannt werden. Darüber hinaus ist auch der Eintrag durch Kalkanstriche, die mit Heringslake versetzt wurden [12], möglich.

Kaliumnitrat und Ammoniumnitrat

Auch die Nitratbelastung an Bauwerken ist eine Folge von Fremdeintrag. Eine mögliche Quelle ist mikrobieller Befall durch Nitrifikanten. Darüber hinaus entstehen Nitrate durch Reaktionen von Ammonium- und NO_x -Verbindungen mit kalk- und alkalihaltigen Baustoffen in Gegenwart des Luftsauerstoffes. Erhöhte Nitratgehalte sind häufig in ländlichen Gegenden in Gebäuden mit Tierhaltung und in der Nähe von Kläreinrichtungen anzutreffen (siehe dazu auch Punkt 3.1). Kaliumnitrat kann u.a. auch durch Schwarzpulverlagerung eingetragen worden sein.

5.1.3 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Zur Untersuchung des Einflusses des Porenraumes auf die Verträglichkeit o.g. Systeme wurden Bindemittelleime bzw. verfestigte Bindemittel und Schaummörtel mit erhöhtem Porenanteil verwendet. Bei allen Versuchen wurde mit einem einheitlichen Wasser-Bindemittel-Wert von 0,5 sowie einem einheitlichen Bindemittelleim-Schaum-Verhältnis von 2 : 1 gearbeitet.

Die Prüfprismen (Abmessung $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ mit Meßzapfen in den Stirnseiten) mit Salzen wurden 2 unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ausgesetzt: bis zum Entformen Lagerung bei 20 °C und 85 \% r.F. und anschließend bei bauwerksrelevantem Klima von 10 °C und 85 \% r.F. , wie es im Mittel für mehrschaliges, unbeheiztes, historisches Mauerwerk gemessen wurde [14] sowie Wasserlagerung bei 10 °C . Alle Bindemittel-Salz-Kombinationen wurden getrennt gelagert, wobei bei der Wasserlagerung darauf geachtet wurde, daß alle Prüfkörper vom gleichen Wasservolumen umgeben waren. Mit der Wasserlagerung bei der gegenüber Normalklima tieferen Temperatur sollte die Bildung der wasserreichen Treibminerale gefördert werden, damit Gefügeveränderungen an den Prüfkörpern möglichst schnell zu Tage treten. Das kann jedoch u.U. dazu führen, daß sich ein Teil der Salze in dem umgebenden Wasser bzw. in dem nach kurzer Zeit alkalischen Milieu löst, was einem kombinierten Angriff (äußerer und innerer Angriff) entspricht. Mögliche Löseerscheinungen können anhand der Masseänderung erfaßt werden.

5.1.4 Ergebnisse der Dehnungsmessungen und Beschreibung der äußeren Beschaffenheit

Die Ergebnisse der Längenmessungen sowie die zugehörigen Masseänderungen bei Wasser- und Feuchtlagerung zeigen die Tabellen A4 bis A19 im Anhang. Die Tabelle

50 zeigt die Dehnungen als Differenz der Bindemittel- und Schaummörtelprismen mit Salzen und der Bindemittel- bzw. Schaummörtelprismen ohne Salz (Nullproben) bei Wasserlagerung. Die Masseänderungen sind nicht geeignet zur Beschreibung der Verträglichkeit in Gegenwart von Salzen, weil sich hygroskopische Feuchteaufnahme, osmotische Effekte durch chemische Konzentrationsunterschiede (siehe dazu auch [60]), Löseerscheinungen (nur bei WL) und die Massezunahme durch Hydratwasserbindung bei der möglichen Treibmineralbildung überlagern.

Zur Beurteilung der Verträglichkeit wurden der Verlauf der Längenänderung im Untersuchungszeitraum, die Längenänderung nach 3 bzw. 4 Jahren als Differenz zur Nullprobe sowie die äußere Beschaffenheit der Prüfkörper herangezogen. Die Bewertung erfolgt in den Spalten 4 und 5 der Tabelle 50. Dabei bedeuten:

- ... Unverträglichkeit (Differenz zur Nullprobe > 2 mm/m)
- * ... bedingte Verträglichkeit (Differenz zur Nullprobe ≤ 2 mm/m)
- + ... gute Verträglichkeit (Differenz zur Nullprobe ≤ 0,5 mm/m)
- R ... Rißbildung, wird generell als unverträglich bewertet

Tabelle 50: Längenänderungen nach 3a bzw. 4a Wasserlagerung und Bewertung

		Differenz zur Nullprobe in mm/m		Bewertung der Verträglichkeit	
		BM	SM	BM	SM
KNO₃	4a				
CEM I 42,5 R-HS		0,41	0,98	+	*
CEM I 42,5 R		1,46	1,17 ¹⁾	*	- R
CEM III/B 32,5 NW/HS		0,29	0,38	+	+
HAZ		0,64	0,25	*	+
NH₄NO₃	4a				
CEM I 42,5 R-HS		2,25	1,28	-	*
CEM I 42,5 R		3,74	2,49	-	-
CEM III/B 32,5 NW/HS		0,99 ²⁾	0,37	- R	- R
HAZ		n.m. ³⁾	n.m. ³⁾	-	-
CaSO₄	4a				
CEM I 42,5 R-HS		1,41	1,09	*	*
CEM I 42,5 R		19,2 ⁴⁾	2,80 ⁵⁾	- R	- R
CEM III/B 32,5 NW/HS		6,89	3,62	- R	- R
HAZ		0,36	0,27	+	+
MgSO₄	4a				
CEM I 42,5 R-HS		2,59	2,53	-	-
CEM I 42,5 R		19,4 ⁶⁾	5,91 ⁷⁾	-	- R
CEM III/B 32,5 NW/HS		7,0	20,9	- R	- R
HAZ	1a	0,86 ⁸⁾	0,55 ⁸⁾	*	- R
NaCl	3a				
CEM I 42,5 R-HS		1,43	0,63	*	*
CEM I 42,5 R		2,04	0,60	- R	*
CEM III/B 32,5 NW/HS		2,20	1,62 ²⁾	-	*
HAZ		2,00	0,35	*	+

¹⁾ nur 2a-Wert, da anschließend Meßzapfen locker (siehe Bild A1 im Anhang)

²⁾ Wert der FL, da bei WL Δl mit Salz < Δl ohne Salz (Löseerscheinungen)

³⁾ nicht meßbar, da keine Erhärtung eingetreten (siehe Bild

⁴⁾ nur bis 270 d meßbar, PK zertrieben ⁵⁾ nur bis 90 d meßbar, PK zertrieben

- 6) nur bis 1a meßbar, PK zerrieben 7) nur bis 56 d meßbar, PK zerrieben
8) Erhärtungsverzögerung, beim SM stärker ausgeprägt

Im Fall der bedingten Verträglichkeit wird die Einsatzmöglichkeit des jeweiligen Bindemittels von den konkreten Bedingungen am Sanierungsobjekt wie quantitative Salzbelastung, Feuchtebelastung, interne Wasserführung am Bauwerk und Exposition des Bauteils (Sockelbereich, Mauerkrone etc.) abhängig gemacht.

CEM I 42,5 R

Die Bilder 102 und 103 zeigen den Verlauf der Dehnung der Prüfkörper aus CEM I 42,5 R-Bindemittel und -Schaummörtel in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung.

Bild 102: Längenänderung des CEM I 42,5 R in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung (10 °C) bis zu 3 bzw. 4 Jahren

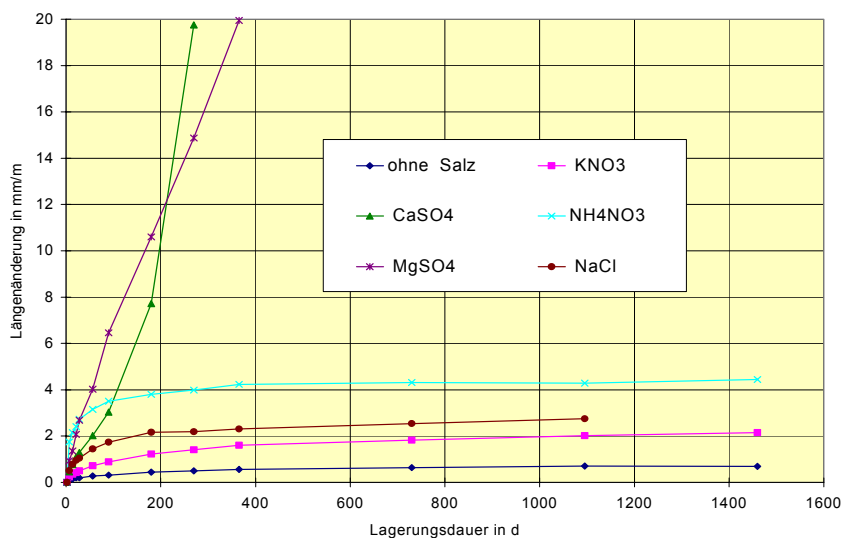
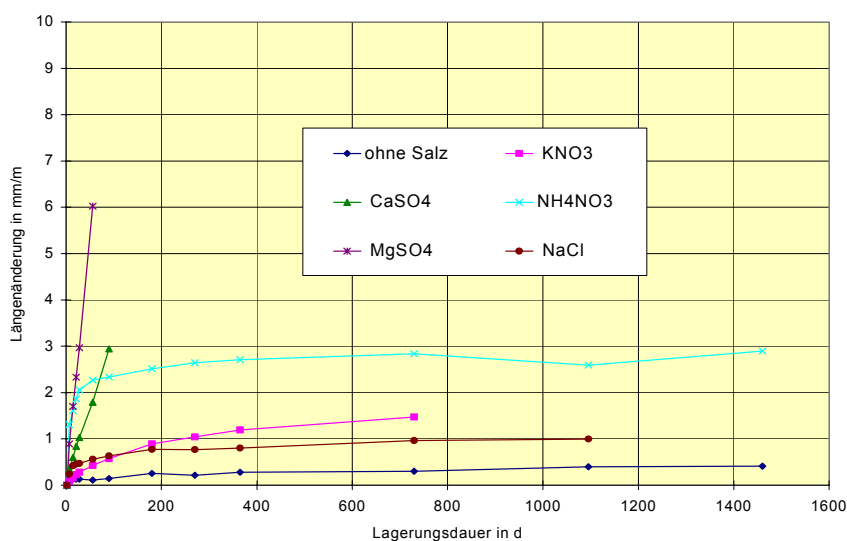


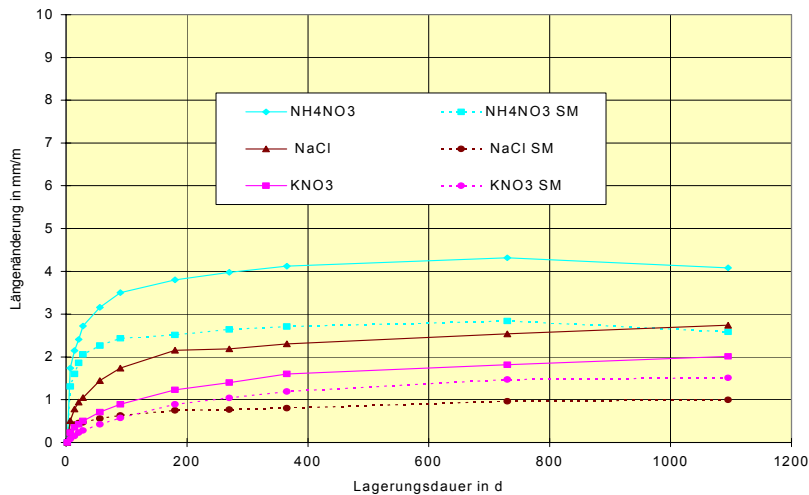
Bild 103: Längenänderung des CEM I 42,5 R mit Schaum in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung (10 °C) bis zu 3 bzw. 4 Jahren



Die größten Dehnungen treten in Gegenwart des $MgSO_4$ und $CaSO_4$ auf, die sowohl beim erhärteten Bindemittel als auch beim Schaummörtel zu Gefügeschäden bis hin zur völligen Zerstörung der Prüfkörper führen (Bilder A2 und A3 im Anhang). Die 166

Gefügeschäden treten in der Form von netzartigen Rissen, Abplatzungen der „Bindemittelhaut“ an der Oberfläche (Bild A3) sowie der Prismenecken und -kanten und in der Form von Verkrümmungen auf. Bei den anderen Salzen (NH_4NO_3 , KNO_3 und NaCl) traten beim Schaummörtel geringere Dehnungen auf als beim erhärteten Purzement (Bild 104).

Bild 104: Reduzierung der Dehnungen durch die Schaumporen in Gegenwart von NH_4NO_3 , KNO_3 und NaCl (Wasserlagerung, 10 °C)



Der C_3A -reiche Zement ist allgemein als salzunverträglich zu bewerten. Eine bedingte Verträglichkeit ist nur in Gegenwart von KNO_3 gegeben. Bei Einwirkung von NaCl wird die Dehnung durch Vorhandensein der Schaumporen soweit reduziert, daß der Einsatz in Abhängigkeit von den konkreten Objektbedingungen der Einsatz von CEM I 42,5 R möglich erscheint.

CEM I 42,5 R-HS

Die Bilder 105 und 106 zeigen die Längenänderung der Prüfkörper aus CEM I 42,5 R-HS Bindemittel und Schaummörtel in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung. Bild 107 veranschaulicht die Längenänderungen des erhärteten CEM I 42,5 R-HS bei Feuchtlagerung. Vergleicht man die Bilder 105 und 107, so ist folgendes festzustellen: die Tendenzen der Wirkungen der Salze auf das Bindemittel bei der praxisrelevanteren Feuchtlagerung entsprechen denen bei Wasserlagerung. Die absoluten Längenzunahmen sind kleiner als bei der Wasserlagerung, die Differenzen zur Nullprobe (mit Schwindwerten) sind z.T. geringfügig höher.

Der C_3A -arme Zement ist salzverträglicher als der C_3A -reiche PZ, d.h. die Dehnungen in Gegenwart der Salze sind deutlich niedriger. Unverträglichkeit tritt bei diesem Zement nur im Kontakt zum MgSO_4 und NH_4NO_3 auf. Bei innerem Angriff von CaSO_4 ist der C_3A -arme, speziell für äußeren Sulfatangriff konzipierte PZ nur bedingt einsetzbar. Der zusätzliche Porenraum bei den Schaummörteln aus CEM I 42,5 R-HS bewirkt eine Reduzierung der Dehnungen außer bei Vorhandensein von KNO_3 .

Bild 105: Längenänderung des CEM I 42,5 R-HS in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung (10 °C) bis zu 3 bzw. 4 Jahren

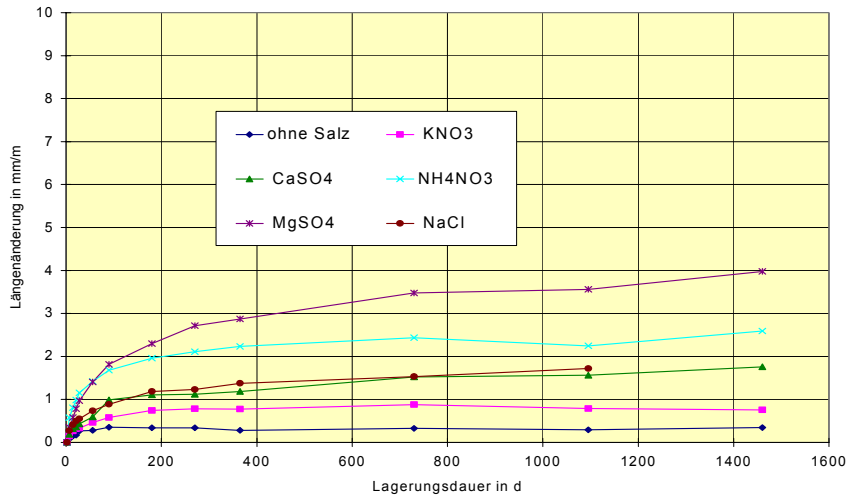


Bild 106: Längenänderung des CEM I 42,5 R-HS mit Schaum in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung (10 °C) bis zu 3 bzw. 4 Jahren

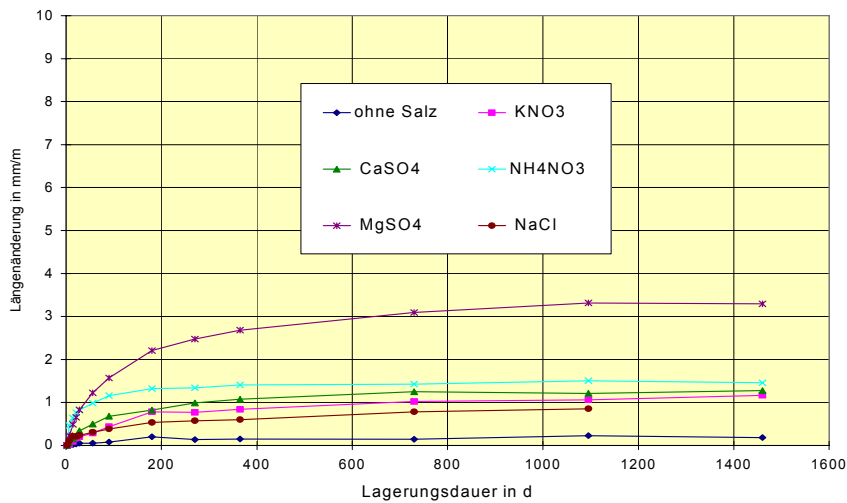
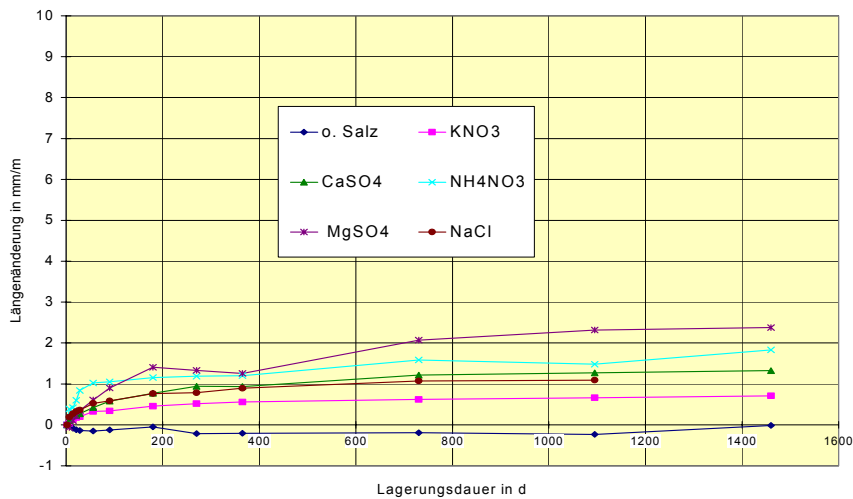


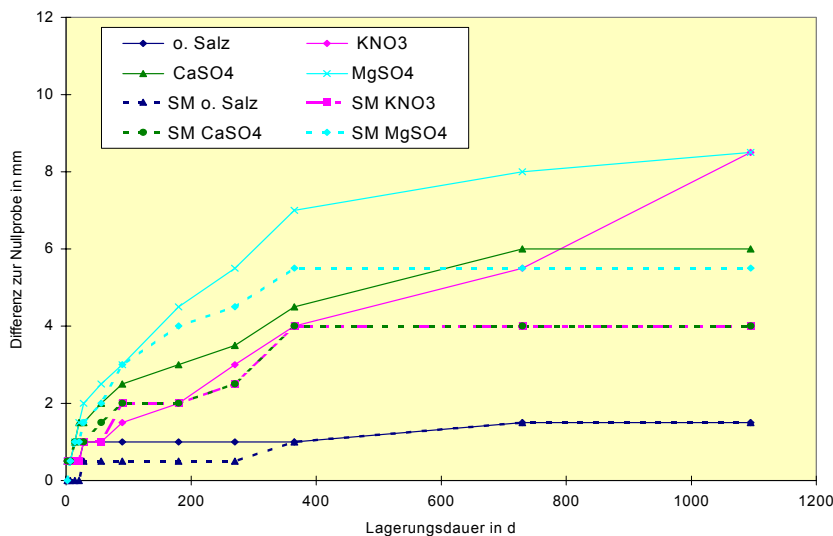
Bild 107: Längenänderung des CEM I 42,5 R-HS in Gegenwart der Salze bei Feuchtlagerung (10/90) bis zu 3 bzw. 4 Jahren



Parallel zu den Prismen wurden auch Verträglichkeitsuntersuchungen anhand von Le-Chatelier-Ringen durchgeführt an den selben Mischungen (10 % Salz bezogen auf BM-Einwaage, ohne und mit Schaum), die auch für die Prismen verwendet wurden. Die Ergebnisse am Beispiel des CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum bei Wasserlagerung zeigen Tabelle A20 im Anhang und Bild 108.

Tendenziell sind die Wirkungen der einzelnen Salze auf die Dehnung des Bindemittels ohne und mit Schaum vergleichbar (außer bei KNO_3), eine Differenzierung der Ergebnisse bzw. eine Festlegung von Grenzen zur Bewertung der Verträglichkeit ist jedoch weit schwieriger als anhand der Längenerfassung bei den Prismen. Auch traten die erhöhten Dehnungen bei Unverträglichkeit nicht zeitiger als bei den Prismen auf, wie es anhand der bisherigen Erfahrungen [57] erwartet wurde. Für die Untersuchung der Verträglichkeit mit den Salzen sind die Prismen besser geeignet als die Le-Chatelier-Ringe. Bei unzureichendem Probematerial für die Prismenherstellung kann jedoch auf die Ringe zurückgegriffen werden.

Bild 108: Dehnung (=Nadelspitzenabstand als Differenz zur Nullprobe) des CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum nach 3 a Wasserlagerung



HAZ

Die Bilder 109 und 110 zeigen den Verlauf der Längenänderung der Prüfkörper aus HAZ- Bindemittel und HAZ-Schaummörtel in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung.

Der nachgestellte Sulfathüttenzement ist allgemein gut salzverträglich auch bei innerem Angriff. Die Beständigkeit von Sulfathüttenzement gegenüber Lösungen mit Magnesiumsulfat, Ammoniumsulfat sowie einem Gemisch aus Huminsäure, Magnesiumsulfat und Natriumchlorid wurde bereits von Blondiau, Hummel und Charisius beschrieben (zusammengefaßt in [79]).

Bild 109: Längenänderung des HAZ ohne Schaum in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung (10 °C)

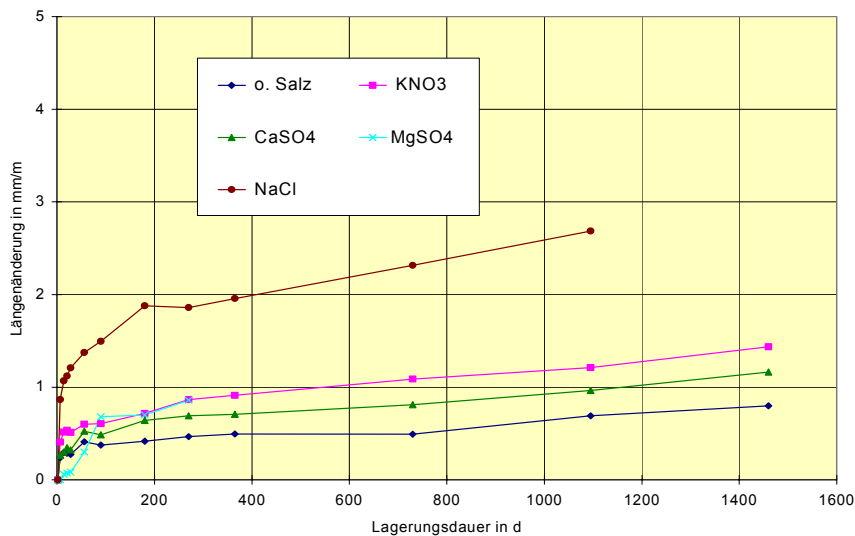
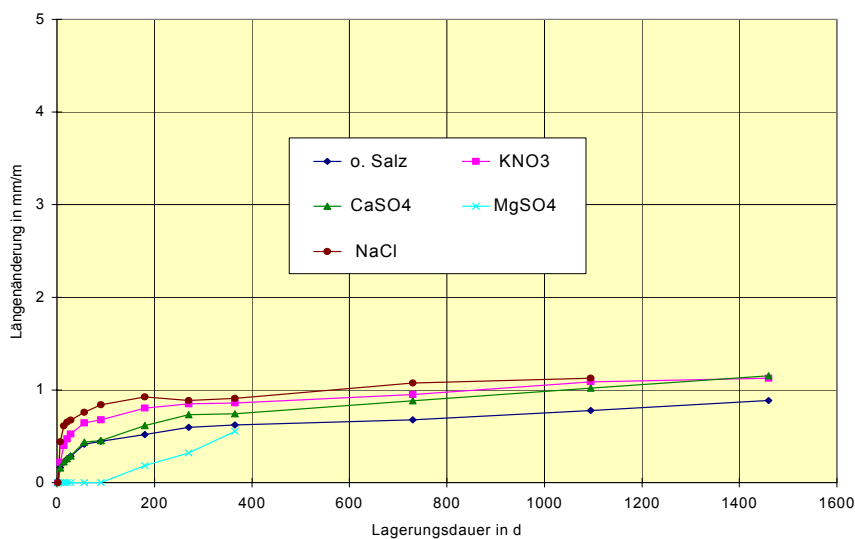


Bild 110: Längenänderung des HAZ mit Schaum in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung (10 °C)



Im Fall einer hohen Magnesiumsulfatbelastung am Bauwerk stellt der HAZ von den untersuchten hydraulischen Bindemitteln (trotz Abbindeverzögerung) überhaupt die einzig praktikable Lösung dar, sofern im zu sanierenden Bauwerksabschnitt nicht bereits massiv Portlandzement in einer vorangegangenen Sanierungsmaßnahme verwendet worden ist. Da die Hydratation des HAZ entsprechend seines geringen Kalkgehaltes (siehe Tabelle 12) nicht wie bei PZ und HOZ in kalkgesättigter, sondern in kalkuntersättigter Lösung abläuft, kristallisiert der Ettringit (als ein Haupthydratationsprodukt) ohne Treibwirkung über die flüssige Phase aus [79]. In Gegenwart kalkreicher Lösungen (z.B. von PZ oder $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus Baukalken) kommt es zur Ettringitbildung mit Treibwirkung.

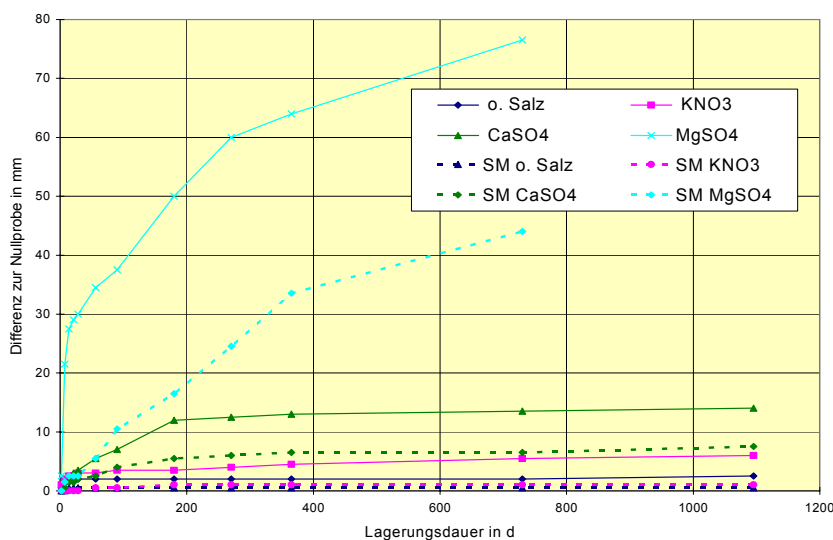
CEM III/B 32,5-NW/HS

Der hüttensandreiche Zement CEM III/B 32,5-NW/HS ist nur mit KNO_3 gut verträglich. In Gegenwart des NH_4NO_3 treten zwar keine großen Dehnungen dafür aber Risse auf (Bild A7). Die größten Dehnungen verbunden mit Gefügeschäden (Bilder A4, A5 und A7 im Anhang) treten - analog zum C_3A -reichen PZ - in Gegenwart des MgSO_4 und CaSO_4 auf. Im Kontakt mit CaSO_4 wirkt sich die Schaumzugabe zum CEM III/B 32,5-NW/HS negativ aus, d.h. die Dehnungen liegen ca. 3fach höher als beim erhärteten Purzement.

Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen an den Ringen für CEM III/B 32,5-NW/HS ohne und mit Schaum bei Wasserlagerung zeigen Tabelle A21 im Anhang und Bild 111.

Die Le-Chatelier-Ringe aus CEM III/B 32,5-NW/HS mit MgSO_4 waren nach 2 Jahren aufgrund der Gefügezerstörung nicht mehr meßbar (Bild A7).

Bild 111: Dehnung (= Differenz im Nadelspitzenabstand) des CEM III/B 32,5-NW/HS ohne und mit Schaum nach 3 a Wasserlagerung

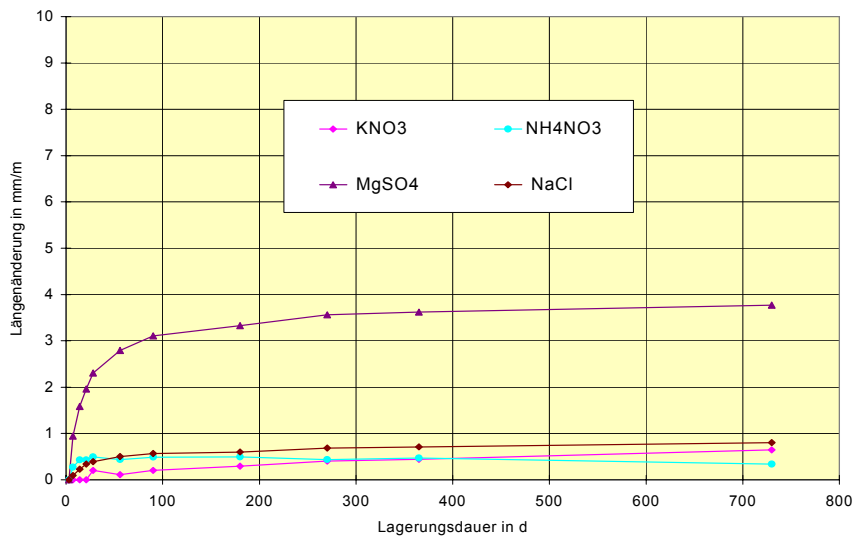


Romankalk

Bild 112 zeigt die Längenänderungen der Romankalkprismen im Kontakt zu den Salzen bis zu 2 Jahren Wasserlagerung. Calciumsulfat wurde dabei nicht untersucht, da die Gipsunverträglichkeit des Romankalkes bekannt ist.

Trotz der geringen Längenänderungen ist der Romankalk als NH_4NO_3 -unverträglich zu bewerten, da nach 180 d Risse auf der gesamten Prüfkörperoberfläche festgestellt wurden (Bild A8 im Anhang). Ebenso zeigten sich Gefügestörungen in der Form von Rissen und Abplatzungen (von den Stirnseiten ausgehend) in Gegenwart des MgSO_4 , wo auch die größten Dehnungen gemessen wurden. KNO_3 und NaCl sind als bedingt verträglich mit dem Romankalk einzustufen.

Bild 112: Längenänderung des Romankalkes in Gegenwart der Salze bei Wasserlagerung (10°C)



Verträglichkeit mit Kaliumnitrat

Im Kontakt zum KNO₃ zeigten alle untersuchten Bindemittel gute bis bedingte Verträglichkeit. Bei der Feuchtlagerung der Prüfkörper traten bei allen Bindemitteln und Schaummörteln mit KNO₃ Salzkristallisationen an den Prüfkörperoberflächen auf. Bild A6 im Anhang zeigt diese, aus reinem KNO₃ bestehenden Kristalle in 50facher Vergrößerung am Beispiel der Oberfläche von HAZ-SM.

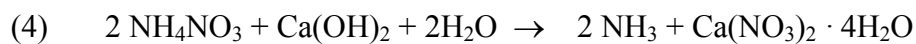
Die größte Längenzunahme bei innerem KNO₃-Angriff zeigte der C₃A-reiche CEM I 42,5 R (1,46 mm/m als Differenz zur Nullprobe), wobei im bisherigen Untersuchungszeitraum keine, für die Längenzunahme verantwortliche Phase nachgewiesen wurde.

Zum Thema Nitratkorrosion auf Zemente und Betone wurden bisher wenige Arbeiten veröffentlicht, deren Ergebnisse auch unterschiedlich sind. In den Untersuchungen wurde generell nur der äußere Angriff durch Nitratlösungen betrachtet (NH₄NO₃ und NaNO₃ [1,19], Ca(NO₃)₂ [1,72], Mg(NO₃)₂ und Pb(NO₃)₂ [1]) und deren Wirkungen auf Druck-, Zugfestigkeiten, Porosität und Längenänderung beschrieben. Dabei wird allgemein eher von einer zermürbenden als von einer treibenden Wirkung ausgegangen. Nach Biczók sind nur Ammoniumnitrat und in geringem Umfang auch Aluminiumnitrat schädlich, da sich aus dem Portlandit und dem Salpetersäurerest unter Verflüchtigung des Ammoniaks leicht lösliches Calciumnitrat bildet, was zur „Entkalkung“ des Zementes bzw. Betones führt (Gleichung 4).

Verträglichkeit mit Ammoniumnitrat

In diesem Fall traten insgesamt höhere Dehnungen auf als beim Kontakt zu KNO₃, sowohl bei den Prismen ohne als auch mit Schaum. Darüber hinaus wurde bei allen Bindemitteln mit NH₄NO₃ ab dem Mischen im Mörtelmischer Ammoniak freigesetzt, was bei der Lagerung mehrere Tage andauerte. Beim HAZ war keine Längenerfassung

möglich, da eine deutliche Erhärtungsstörung eintrat. Das führte dazu, daß die Prüfkörper nicht in der gewünschten Weise der Prismenform entnommen werden konnten. Zur Klärung der Ursache wurden phasenanalytische Untersuchungen durchgeführt. Während im Ergebnis der Röntgendiffraktometrie keine kristallinen Veränderungen gegenüber der Probe ohne Salz nachgewiesen wurden, zeigten sich bei der DTA zwei Dehydratationspeaks, die ein Hinweis auf die Bildung von Kalksalpeter sein können. Durch die Reaktion zwischen dem Ammoniumnitrat und dem freigesetzten Calciumhydroxid des Bindemittels kommt es zur Bildung von Kalksalpeter und Ammoniak, welcher gasförmig entweicht gemäß Gleichung (4):



Möglicherweise läuft diese Reaktion beim kalkuntersättigten HAZ langsamer ab als bei den anderen Bindemitteln, so daß sich die allmähliche Gasentwicklung und -freisetzung ungünstig auswirkt auf das Gefüge der sich bildenden Hydratphasen (Ettringit und C-S-H-Phasen).

Die anderen Bindemittel zeigten ebenfalls deutliche Unverträglichkeit, wobei durch Vorhandensein des erhöhten Porenraumes durch den Schaum die Längenzunahme geringfügig reduziert wurde. Differenzthermoanalytisch wurden gegenüber der Nullprobe ohne NH_4NO_3 auch die beiden Dehydratationspeaks nachgewiesen, die der Bildung von Kalksalpeter zugeordnet werden sowie ein geringfügiger Zuwachs an Ettringit. Das ist jedoch nur möglich durch Verschiebungen in den Gehalten an Monosulfat und Ettringit (ggf. durch pH-Wert-Veränderungen), da keine zusätzliche Sulfatquelle vorhanden war.

Nach [19, 72] ist bei calciumaluminathaltigen Bindemitteln nicht nur die Reaktion des Nitrates mit dem Portlandit, sondern auch mit dem C_3A möglich, was zur Bildung von Tricalciumaluminatmonohydrat führen kann. Dieses kann nach [19] jedoch erst entstehen, wenn nach der in der Erhärtungsphase der Zemente stattfindenden Ettringitbildung noch deutliche Mengen an reaktivem C_3A vorliegen. Die Bindung von Sulfaten an das C_3A ist wesentlich stärker ausgeprägt als die Bindung von Nitraten.

Verträglichkeit mit Calciumsulfat

Während der C_3A -reiche Portlandzement und der CEM III/B 32,5-NW/HS sowohl ohne als auch mit Schaum in Gegenwart des CaSO_4 aufgrund der zusätzlichen Ettringitbildung versagen, zeigt der nachgestellte Sulfathüttenzement (HAZ) eine sehr gute Verträglichkeit. Bei den Bindemitteln CEM I 42,5 R und CEM III/B 32,5-NW/HS konnte zwar durch die erhöhte Porosität bei den Schaummörteln der Längenzuwachs im Kontakt zum CaSO_4 begrenzt werden, jedoch traten die Gefügeschäden bei den Schaummörteln schon bei geringeren Dehnungen auf. Der Einsatz des C_3A -armen Portlandzementes bei calciumsulfatbelasteten Bauwerken ist anhand der vorliegenden Ergebnisse in Verbindung mit entsprechenden Maßnahmen zur Reduzierung des reaktionsfähigen C_3A -Gehaltes („Verdünnungseffekt“) oder durch Absenken des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehaltes [77] möglich, z.B. durch Schaumzugabe und/oder bei Verwendung

von inertem Zuschlag (bei Injektionsmörteln i.d.R. ≤ 1 mm Größtkorn) oder puzzolanischen Zusatzstoffen. Der Einfluß von Feinstzuschlägen (Quarz- und Kalksteinmehl) und SFA auf die Eigenschaften von Injektionsmörteln ohne und mit Schaum wird in [81] beschrieben.

Verträglichkeit mit Magnesiumsulfat

Dem inneren Angriff dieses Salzes konnte bisher nur der HAZ widerstehen (Tabelle 50, Bild 113), obwohl bei diesem Bindemittel zu Beginn der Hydratation eine Erhärtungsverzögerung eintrat. Im Kontakt zum MgSO_4 treten insgesamt die größten Dehnungen verbunden mit Reißbildung auf (siehe Bilder A2, A4, A5 und A7), die auch durch die Gegenwart der Schaumporen nicht verhindert werden können. Im Fall des CEM III/B 32,5-NW/HS sind bei den Prismen mit erhöhtem Porenraum sogar größere Dehnungen aufgetreten.

Die Schädwirkung beruht bekanntermaßen aber nicht nur auf der Reaktion des MgSO_4 mit dem Ca(OH)_2 (5.1) und des gebildeten $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ mit dem C_3A zu Ettringit (5.2), sondern auch auf der möglichen Reaktion mit dem CaO aus den festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen gemäß der Gleichung (5.3), was mit einer Gefügeschwächung und einer Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit von Sulfat bis hin zum Festigkeitsverlust verbunden ist:

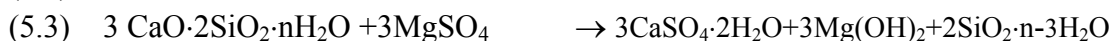
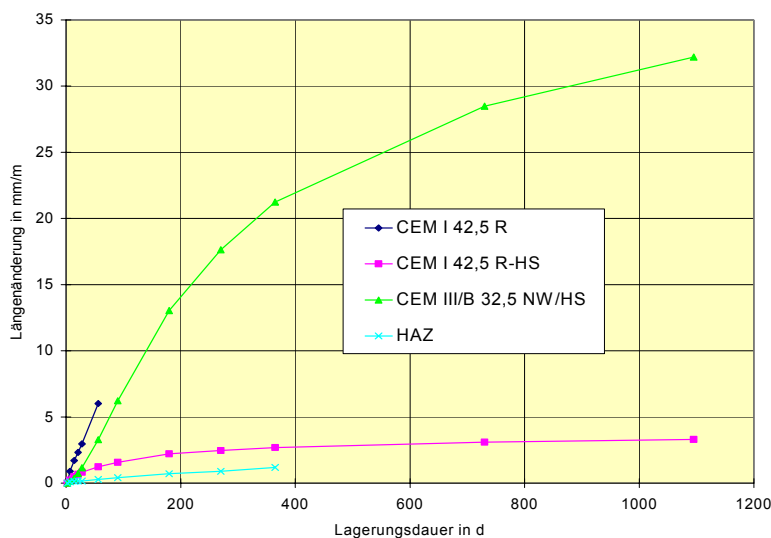


Bild 113: Längenänderungen der Zemente mit Schaum bei innerem Angriff durch MgSO_4

(Wasserlagerung bei 10°C)

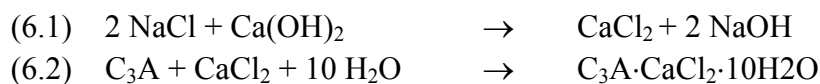


Auffällig ist, daß die Prüfkörper aus CEM III/B 32,5-NW/HS mit MgSO_4 zwar gerissen sind und hohe Dehnungen aufweisen, insgesamt jedoch noch einen Zusammenhalt

besitzen und deshalb meßbar sind, während die Prüfkörper aus CEM I 42,5 R mit $MgSO_4$ bei vergleichsweise hohen Dehnungen nach 56 d (SM) bzw. 365 d (BM_{pur}) zerstört waren. Obwohl zementchemisch die gleichen Reaktionen ablaufen, ist wahrscheinlich auch der Zeitpunkt der Entstehung der Hydratphasen und damit der Gefügeentwicklung maßgebend. Dabei wird wahrscheinlich das Gefüge des langsamer erhärtenden, hüttensandreichen Zementes durch den Druck bei der Volumenexpansion durch die Ettringitbildung weniger belastet als das des schneller erhärtenden und festeren PZ.

Verträglichkeit mit Natriumchlorid

Eine bedingte Verträglichkeit mit diesem Salz weisen die Schaummörtel aus CEM I 42,5 R-HS, CEM I 42,5 R und CEM III/B 32,5 NW/HS sowie der erhärtete HAZ und CEM I 42,5 R-HS auf. Bei allen Zementen bewirkte die erhöhte Porosität durch die Schaumzugabe eine deutliche Reduzierung der Dehnung. Im Kontakt zum NaCl kann es zur Reaktion mit dem Portlandit der Bindemittel kommen, wobei Calciumchlorid entstehen kann (6.1), was unter bestimmten Bedingungen durch Reaktion mit dem C_3A Friedelsches Salz bildet gemäß der Gleichung (6.2):



Die Bildung dieser wasserreichen Verbindung wurde phasenanalytisch im bisherigen Untersuchungszeitraum nicht nachgewiesen. Darüber hinaus bedarf es im Vergleich zum Ettringit auch weitaus größerer Mengen des chloridischen Komplexsalzes, um Zerstörungen hervorzurufen.

5.1.5 Verträglichkeitsuntersuchungen mit reaktionsfähigen Natursteinen

Für diese Untersuchungen wurden die gleichen Natursteine verwendet wie für die Verbunduntersuchungen (Tabellen A1 und A2 im Anhang). Auch die Prüfkörperherstellung mit mittig eingebettetem Naturstein erfolgte in Analogie zu den Verbunduntersuchungen. Die Ergebnisse der Längenmessungen bei Feuchtlagerung (10/85) bis zu 2 Jahren zeigen die Tabellen A22 bis A25 im Anhang.

Im Verbund zu den Natursteinen Gipsstein, Sandstein, dichter Kalkstein (Muschelkalk) und Travertin zeigten die Bindemittel HAZ und CEM I 42,5 R-HS sowohl ohne als auch mit Schaum eine sehr gute Verträglichkeit, was anhand der geringen Dehnungen und der intakten Grenzflächen nach einer Feuchtelagerung von 2 Jahren deutlich wurde. Für die Bindemittel CEM III/B 32,5 NW/HS und CEM I 42,5 R trifft das beim Kontakt zum Gipsstein nicht zu. Hierbei traten Dehnungen durch Ettringit- und Thaumazitbildung (Bild A10 im Anhang), Ausblühungen z.B. in der Form von Syngenit und Beeinträchtigungen der Grenzflächen bis hin zum völligen Verlust des Verbundes auf (Bild A9 im Anhang).

5.2 Äußerer Sulfatangriff

5.2.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Die Prüfung der Sulfatwiderstandsfähigkeit gegenüber äußerem Angriff erfolgte in Anlehnung an das Koch-Steinegger-Verfahren anhand der Bestimmung der Sulfataufnahme, der Messung der relativen Biegezugfestigkeit und der visuellen Begutachtung der Probekörper. Abweichend vom Koch-Steinegger-Verfahren wurden keine Kleinprismen, sondern Normprismen der Abmessung $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ mit Meßzapfen an den Stirnseiten verwendet in Analogie zu den Untersuchungen zum inneren Angriff. Zur Beschleunigung der evtl. eintretenden Treibreaktionen wurden die Versuche nicht bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$, sondern bei $8 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Da aufgrund der größeren Prüfkörpergeometrie ein schwächerer Angriffsgrad zu erwarten war (kleinere belastete Fläche pro Volumeneinheit), wurden die Proben nicht nur 56, sondern 300 Tage lang in 5 %iger Natriumsulfatlösung gelagert.

Die Untersuchungen erfolgten nur bei den Bindemitteln HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum. Bei allen Versuchen wurde mit einem einheitlichen Wasser-Bindemittel-Wert von 0,5 und Bindemittelleim-Schaum-Verhältnissen von 2:1 und 1:1 gearbeitet.

5.2.2 Untersuchungsergebnisse

Sulfataufnahme

Die Sulfataufnahme der Probekörper wird anhand des Titrationsvolumen ($2n \text{ H}_2\text{SO}_4$) in Abhängigkeit von der Prüfdauer veranschaulicht (Bilder 114 und 115). Dabei wurde das Titrationsvolumen zum Vergleich mit den Ergebnissen der Kleinprismenmethode auf die belastete Oberfläche eines Kleinprismas ($= 26 \text{ cm}^3$) bezogen. Bild 116 zeigt die Sulfataufnahme bis zu 56 Tagen von HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne Schaum im Vergleich zum C_3A -reichen PZ.

Der HAZ nimmt sehr wenig Sulfat auf, was u.a. damit zu erklären ist, daß die Porenflüssigkeit des HAZ bereits bei Normallagerung ohne zusätzliche Sulfatzufuhr mit Calciumsulfat übersättigt ist (siehe 5.3.3). Die Sulfataufnahme beim C_3A -armen Portlandzement (CEM I 42,5 R-HS) beträgt ca. das Fünffache des HAZ, ist aber wesentlich geringer als beim C_3A -reichen Portlandzement (CEM 42,5 R) mit vergleichbarer Porosität. Die Sulfataufnahme erhöht sich mit zunehmendem Porengehalt durch die Schaumzugabe. Dieser Effekt ist beim HAZ stärker ausgeprägt als beim CEM I 42,5 R-HS.

Festigkeiten

Tabelle 51 zeigt die Druck- und Biegezugfestigkeiten, die nach 300tägiger Sulfat- (SL) bzw. 330tägiger Wasserlagerung (WL) bei $8 \text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt wurden. Die Druckfestigkeiten der sulfatgelagerten Proben sind höher als die der wassergelagerten. Eine Ausnahme bildet hierbei nur der CEM I 42,5 R-HS ohne Schaum.

Bild 114: Sulfataufnahme in Abhängigkeit von der Prüfdauer beim HAZ

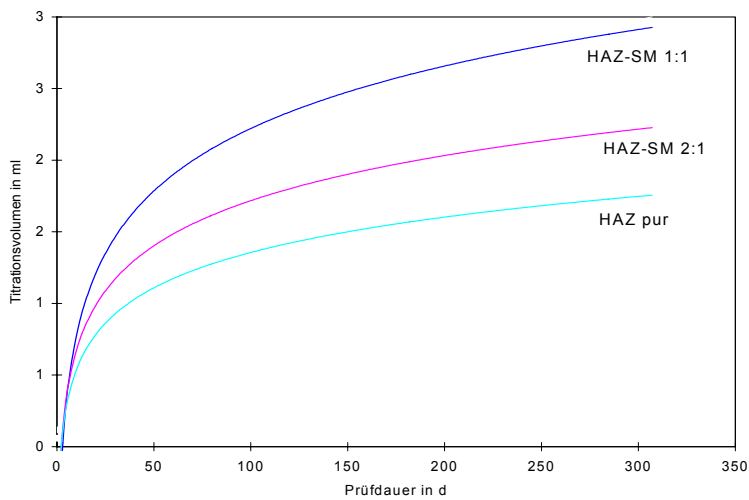


Bild 115: Sulfataufnahme in Abhängigkeit von der Prüfdauer beim CEM I 42,5 R-HS

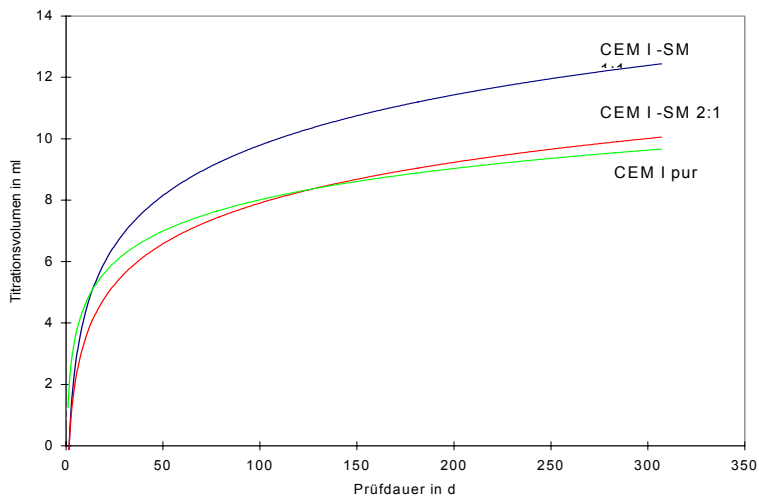
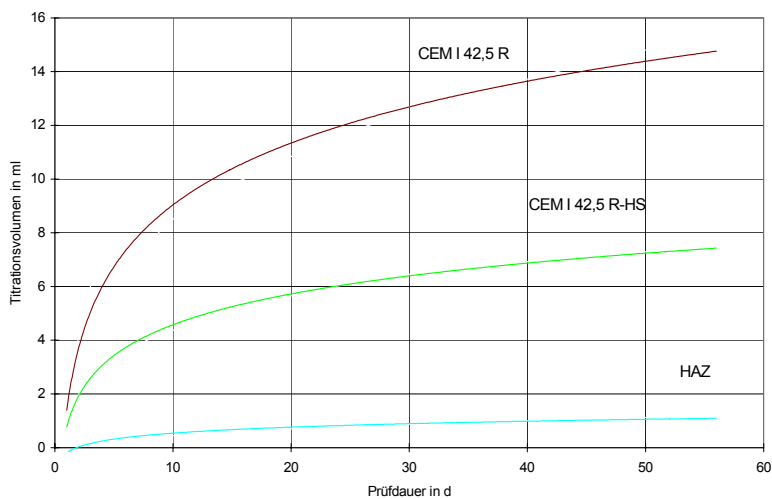


Bild 116: Sulfataufnahme bis zu 56 d - Vergleich: HAZ, CEM I 42,5 R-HS und CEM I 42,5 R ohne Schaum



In Zeile 8 wurde das Verhältnis der Biegezugfestigkeiten bei Sulfat- und Wasserlagerung berechnet. Außer beim HAZ ohne Schaum liegen auch die Biegezugfestigkeiten der sulfatgelagerten Proben höher als die der unter Wasser gelagerten. Mit Biegezugfestigkeitsverhältnissen zwischen 0,94 und 1,9 erfüllen alle geprüften Mörtel die Anforderungen nach Koch-Steinegger $\beta_{BZ\ SL} / \beta_{BZ\ WL} > 0,7$.

Tabelle 51: Druck- und Biegezugfestigkeiten bei Wasser- und Sulfatlagerung in N/mm²

		HAZ			CEM I 42,5 R-HS		
		BM _{pur}	SM 2 : 1	SM 1 : 1	BM _{pur}	SM 2 : 1	SM 1 : 1
β_D	WL	22,4	8,9	2,1	46,7	12,0	5,2
β_D	SL	23,4	10,8	2,2	38,8	14,0	9,8
β_{BZ}	WL	5,0	2,7	1,3	6,7	4,2	2,3
β_{BZ}	SL	4,7	3,4	1,9	8,6	4,9	4,4
$\beta_{BZ\ SL} / \beta_{BZ\ WL}$		0,94	1,25	1,46	1,28	1,17	1,9

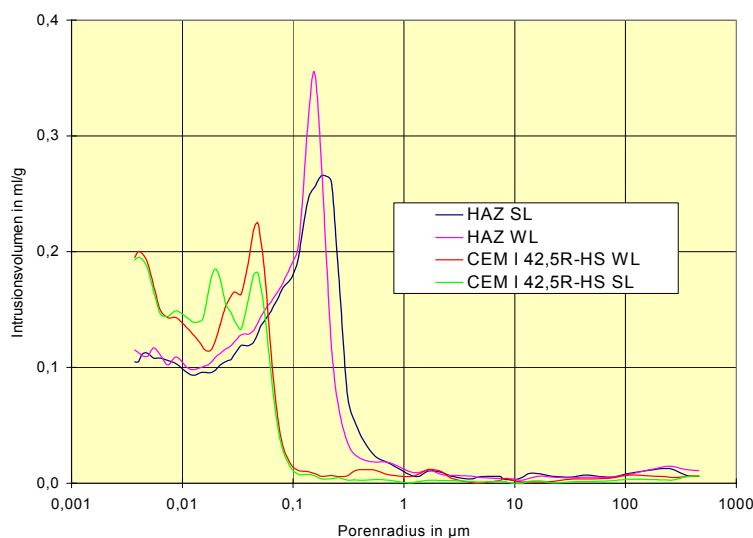
Gesamtporosität und Porengrößenverteilung

Bild 117 zeigt die mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie bestimmte Porengrößenverteilung der Bindemittel ohne Schaum nach Sulfat- und Wasserlagerung und Tabelle 52 wichtige Porenkennwerte.

Tabelle 52: Mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie ermittelte Porenkenngrößen

	HAZ WL	HAZ SL	CEM I 42,5 R-HS WL	CEM I 42,5 R-HS SL
Porosität in %	42,2	42,5	33,3	32,0
mittl. Porenradius in μm	0,07	0,07	0,02	0,01

Bild 117: Porengrößenverteilung der Bindemittel ohne Schaum nach Sulfat- und Wasserlagerung



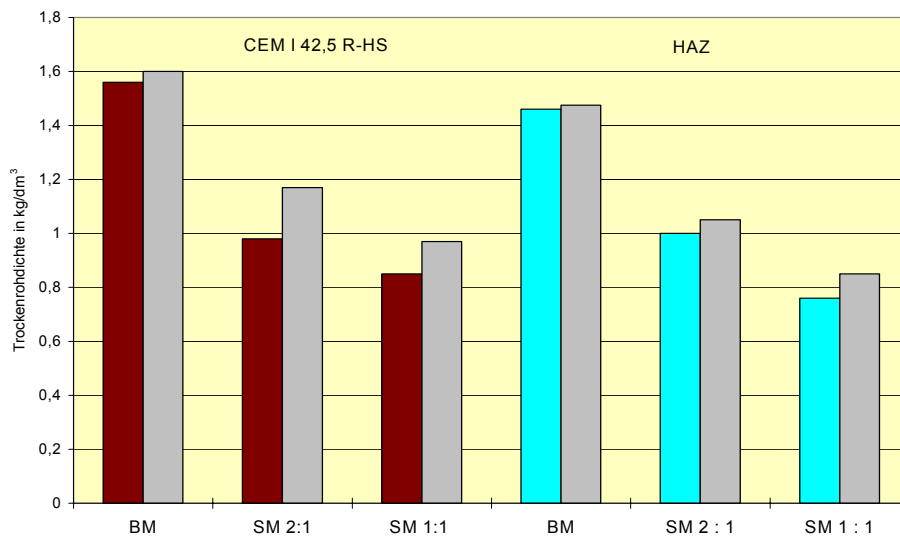
Beim CEM I 42,5 R-HS tritt als Folge der Sulfatlagerung eine Verschiebung zu kleineren Porenradien im Bereich der Gelporen ein, gekennzeichnet durch ein zweites Porenmaximum bei ca. 0,02 μm . Die Porenradienverteilung des HAZ hingegen wird durch die Sulfatzufuhr nicht wesentlich beeinflusst.

Die Bestimmung der Rohdichte, Reindichte und Gesamtporosität erfolgte in Anlehnung an DIN 52102, die Bestimmung des massebezogenen Wasseraufnahmegrades nach DIN 52103 nach Trocknung bis zur Massekonstanz bei 40 °C. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 53.

Tabelle 53: Rohdichte, Reindichte, Gesamtporosität und Wasseraufnahme

Nr.	Wasserlagerung				Sulfatlagerung			
	ρ_{roh} in kg/dm^3	ρ_{rein} in kg/dm^3	GP in %	WA in %	ρ_{roh} in kg/dm^3	ρ_{rein} in kg/dm^3	GP in %	WA in %
CEM I 42,5 R-HS								
BM _{pur}	1,56	2,35	33,6	17,1	1,60	2,34	31,6	15,9
SM 2 : 1	0,98	2,33	57,9	27,5	1,17	2,33	49,8	19,0
SM 1 : 1	0,85	2,32	63,4	30,4	0,97	2,33	58,1	22,6
HAZ								
BM _{pur}	1,46	2,37	38,4	22	1,47	2,42	39,1	20,3
SM 2 : 1	1,00	2,45	59,0	34,9	1,05	2,41	56,4	29,3
SM 1 : 1	0,76	2,46	69,0	51,6	0,85	2,43	64,8	41,6

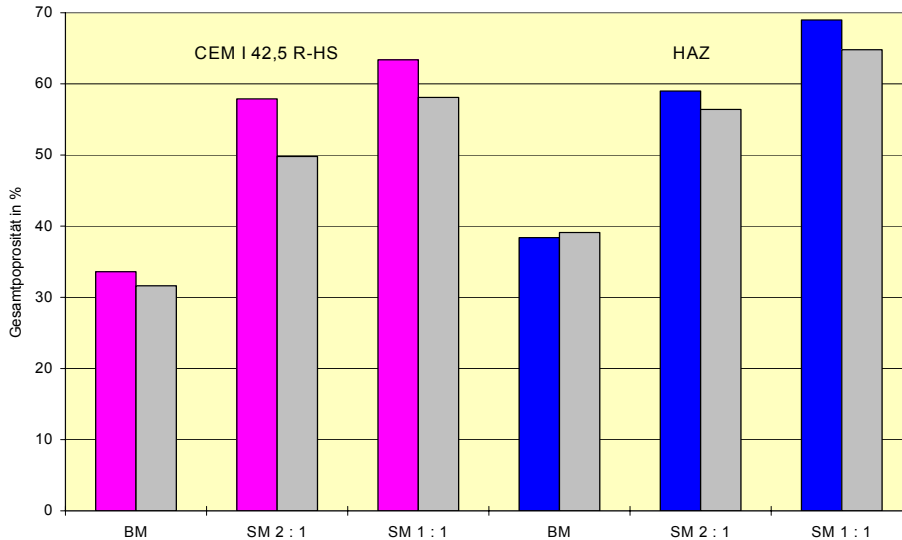
Bild 118: Trockenrohdsichten des HAZ und CEM I 42,5 R-HS nach einjähriger Wasserlagerung (linker Balken) und Sulfatlagerung (rechter Balken)



Durch die Sulfatlagerung tritt beim CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum eine Gefügeverdichtung ein, die sich durch zunehmende Rohdsichten und abnehmende Gesamtporositäten äußert. Gleiches gilt - wenn auch in geringerem Maße - für den HAZ

mit Schaum. Rohdichte und Gesamtporosität des erhärteten HAZ ohne Schaum hingegen werden durch die Sulfatlagerung nur unwesentlich beeinflusst. Die REM-Aufnahmen A11 und A12 im Anhang zeigen das Poreninnere von HAZ-SM und SM aus CEM 42,5 R-HS in 400 bzw. 600facher Vergrößerung.

Bild 119: Gesamtporositäten des HAZ und CEM I 42,5 R-HS nach einjähriger Wasserlagerung (farbig) und Sulfatlagerung (grau)



Längenänderung

Die Tabelle A26 im Anhang dokumentiert die Längenänderung als Differenz zwischen der Längenänderung der sulfat- und wassergelagerten Proben.

Während beim HAZ keine Veränderung durch die Sulfatlagerung festzustellen ist, nimmt die Dehnung beim CEM I 42,5 R-HS leicht zu. Dabei ist die Dehnung bei den Proben mit Schaum etwas größer als bei der Probe ohne Schaum. Aufgrund der Längenänderung $< 0,5$ mm/m kann bei beiden Bindemitteln mit und ohne Schaum davon ausgegangen werden, daß keine Treiberscheinungen durch Phasenneubildung eingetreten sind.

Beschaffenheit der Prüfkörper

Bei den Prüfkörpern aus HAZ ohne und mit Schaum sind keine Veränderungen der äußeren Beschaffenheit durch die Sulfatlagerung aufgetreten. Die Prüfkörper sind scharfkantig und rißfrei. Gemäß der Bewertungstafel nach Koch-Steinegger ist dieses Bindemittel der Stufe 1 zuzuordnen. Bei den Prüfkörpern aus CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum zeigten sich nach ca. 240tägiger Sulfatlagerung Haarrisse an den Kanten, die sich später aufweiteten und zu teilweisen Ablösungen an den Kanten führten. Gemäß der Bewertungstafel nach Koch-Steinegger sind die Prüfkörper aus CEM I 42,5 R-HS der Stufe 4 zuzuordnen.

5.2.3 Bewertung

Die Bindemittel HAZ und CEM I 42,5 R-HS ohne und mit Schaum sind als widerstandsfähig gegenüber äußerem Sulfatangriff zu bewerten. Die Sulfatwiderstandsfähigkeit des CEM I 42,5 R-HS ist geringer als beim HAZ, was sich u.a. in einer höheren Sulfataufnahme und einer von den Prüfkörperkanten aus beginnenden Gefügeschwächung äußert. Diese Gefügeschwächung wirkte sich widersprüchlich auf die Festigkeiten aus: bei zunehmender Biegezugfestigkeit wurde ein Druckfestigkeitsabfall festgestellt. Bei den Proben mit Schaum erhöhte sich erwartungsgemäß die Sulfataufnahme, was aber zu keiner Beeinträchtigung der Festigkeiten und des Gefüges führte.

5.3 Chemische Zusammensetzung der Porenlösung ohne und mit Sulfatzusatz

Zur Unterstützung der Interpretation der Ergebnisse der Dehnungsmessungen bei innerem und äußerem Sulfatangriff wurde die Zusammensetzung der Porenlösung nach einer Erhärtungsdauer von 90 Tagen ermittelt. Da es sich bei den untersuchten Bindemitteln um heterogene Systeme bestehend aus PZ-Klinker, Sulfatträger und z.T. puzzolanischen oder latent hydraulischen Zuschlagstoffen handelt, wurden nicht nur die Bindemittel, sondern auch die puzzolanischen und latent hydraulischen Einzelkomponenten untersucht. D.h. es wurden nicht nur Portlandzemente (CEM I), die hüttensandreiche Zemente (CEM III/B und HAZ), Flugaschezement (CEM II/A-V 32,5 R) und Traßkalk, sondern auch die zugehörigen Hüttensande, die Flugasche und die Traßmehle einbezogen. Da letztgenannte nicht selbständig, sondern nur in Gegenwart von Calciumhydroxid erhärten, wurden sie mit gesättigter $\text{Ca}(\text{OH})_2$ angemacht und werden im folgenden als Feststoffe bezeichnet. Die chemische Zusammensetzung aller untersuchten Bindemittel und Feststoffe in der Übersicht zeigt Tabelle 54. In Tabelle 55 sind die Freikalk- bzw. die Portlanditgehalte sowie die Gehalte an wasserlöslichen Alkalien und Sulfat dargestellt.

Tabelle 54: Chemische Zusammensetzung der Feststoffe und Bindemittel in %

	GV b. 1000°C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	S ²⁻	Cl ⁻
HÜS Dortmund	Zun.	33,8	11,5	4,1	40,5	7,4	0,22	0,55	0,24	0,1	1,7	0,009
HÜS Holland	Zun.	31,9	16,5	0,43	36,6	10,2	0,82	0,46	0,35	0,2	1,1	n.b.
Traß Meurin	5,6	56,2	16,9	4,4	3,4	0,8	0,54	4,31	5,14	0,08	n.b.	---
Traß Märker	3,4	64,9	15,3	3,8	2,9	0,6	0,78	2,57	2,33	0,1	n.b.	0,005
SFA Altbach	3,0	44,7	29,5	7,5	4,5	1,8	1,06	4,23	0,70	1,4	n.b.	0,008
CEM II/A-V 32,5 R	1,1	23,3	9,3	3,8	54,7	2,0	n.b.	1,61	0,20	2,8	n.b.	0,009
Traß-Kalk Meurin	6,1	40,9	12,5	4,3	24,3	2,2	0,49	3,56	2,18	2,2	n.b.	0,023
Traß-Kalk Märker	18,7	20,8	5,1	2,0	48,1	1,0	0,25	0,78	0,48	1,0	n.b.	0,018
CEM I 42,5 R	3,2	20,7	5,5	2,1	64,0	0,8	n.b.	0,96	0,12	2,9	---	<0,01
CEM I 42,5 R-HS	1,3	21,5	4,0	6,1	64,2	0,2	n.b.	0,52	0,11	2,2	---	---
CEM III/B32,5-NW/HS	0,2	28,0	10,7	1,4	47,3	3,4	0,44	0,95	0,39	3,9	0,6	0,012
HAZ	0,3	32,1	10,3	0,98	42,9	6,8	n.b.	0,73	0,34	5,1	n.b.	n.b.
TUBAG 393	3,8	47,8	21,6	5,5	12,3	2,3	0,90	2,83	1,44	0,7	0,3	n.b.

5.3.1 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Für das Auspressen der Porenlösung ist keine bestimmte Prüfkörpergeometrie gefordert. Zur Vermeidung zusätzlicher Probenaufbereitung vor dem Auspreßvorgang ist es günstig, die Prüfkörpergröße dem Durchmesser des Preßstempels anzupassen, weshalb die Mischungen in 150 ml-Kunststoffflaschen gefüllt wurden. Zur Vermeidung der Karbonatisierung wurden die Flaschen bis zum Rand gefüllt, luftdicht verschlossen und nach 90tägiger Lagerung bei 5 °C und 25 °C erst unmittelbar vor dem Auspreßvorgang geöffnet.

Mischungsverhältnisse je Probe: 100 g Feststoff 100 g Bindemittel
 + 50 ml Ca(OH)₂-Lösung + 35 ml dest. Wasser
 + 10 g Rohgips + 10 g Rohgips

Tabelle 55: Freikalk-, wasserlösliche Alkali- und Sulfatgehalte

	CaO _{fr.}	HCl _{unl.}	K ₂ O _{wl.}	Na ₂ O _{wl.}	SO ₃ wl.
HÜS Dortmund	n.b.	n.b.	0,02*	---	n.b.
HÜS Holland	---	n.b.	0,03*	---	n.b.
Traß Meurin	n.b.	39,8*	0,15*	0,46*	0,05*
Traß Märker	n.b.	91,8*	0,04*	0,02*	0,2*
SFA Altbach	---	n.b.	0,11*	0,07*	1,6*
CEM II/A-V 32,5 R	0,80	n.b.	0,84*	0,05*	2,06*
Traß-Kalk Meurin	1,7***	32,7*	0,39*	0,12*	0,16*
Traß-Kalk Märker	6,6***	17,5*	0,17*	0,02*	0,02*
CEM I 42,5 R	2,0	n.b.	1,08*	0,09*	n.b.
CEM I 42,5 R-HS	0,06	n.b.	0,31*	0,02*	n.b.
CEM III/B32,5-NW/HS	0,03	n.b.	0,30*	0,04*	n.b.
HAZ	n.b.	n.b.	0,04*	0,01*	2,35*
TUBAG 393	0,40	n.b.	0,17*	0,10*	n.b.

* in der Summe nicht enthalten

** Franke-Methode; bestimmt

*** auch Ca(OH)₂

n.b. - nicht bestimmt

5.3.2 Auspreßvorgang

Die Einrichtung zum Auspressen der Porenlösung besteht aus einem inneren und einem äußeren Stahlzylinder auf einem Preßteller mit Innenbohrung und Ausflußöffnung. Der mechanische Druck wird mittels eines Preßstempels auf die Probe übertragen, wobei sich zwischen dem Stempel und der Probe eine Abdichtungsscheibe aus Teflon befindet. Die Proben werden mit zunehmendem Druck belastet, wodurch eine Migration der Flüssigkeit aus dem Porensystem in den Sammelbehälter erreicht wird. Die Druckbelastung beträgt 320 N/mm² (ca. 40 t bei 12,5 cm²) bei einer Belastungsgeschwindigkeit von etwa 3 N/mm²·s. Nach einer zweiminütigen Haltezeit wird die Probe kurz entlastet und wiederholt bis zur Maximallast belastet.

Leider konnte nicht von allen Proben mit Hilfe dieses Auspreßverfahrens Porenflüssigkeit gewonnen werden. Das liegt zu einem an der starken Wasserbindung in den sich bildenden Hydratphasen (bei zu geringem Wasserüberschuß, z.B. CEM I 42,5 R und CEM I 42,5 R-HS) und zum anderen an der begrenzten Druckbelastung der Preßeinrichtung. Ein anderer Aspekt ist die nicht in jedem Fall eingetretene Verfestigung der Mischungen (z.B. beim Traß und der SFA), was auf einen geringen

Hydratationsgrad schließen läßt. Bei diesen Proben wurde durch Extraktion die „Porenflüssigkeit“ gewonnen (Tabelle 56).

Tabelle 56: Art der Gewinnung von Porenlösung

	Auspressen	Extraktion		Auspressen
HÜS Dortmund	+		CEM III / B 32,5-NW/HS	keine Porenlösung
HÜS Holland	+		CEM I 42,5 R	keine Porenlösung
Traß Meurin		+	CEM I 42,5 R-HS	keine Porenlösung
Traß Märker	keine Porenlösung		CEM II/A-V 32,5 R	+
SFA		+	Tubag 393	+
Traß-Kalk Meurin	+		HAZ	+
Traß-Kalk Märker	+			

5.3.3 Chemische Zusammensetzung der Porenlösung und pH-Werte

Die mittels Emissionspektrometrie (ICP-OES) bestimmte Oxidzusammensetzung und die pH-Werte der Porenlösungen zeigen die Bilder 120 bis 125. Dabei wurden die Ionenkonzentrationen in Oxidgehalte umgerechnet.

Der größte Anteil an Ionen in der Porenlösung besteht aus Alkalien und Sulfat. Die Löslichkeit des CaO liegt ca. eine Zehnerpotenz niedriger. Sehr niedrig sind die löslichen Anteile an Al₂O₃, SiO₂ und Fe₂O₃. Die löslichen Gehalte an SiO₂ und Fe₂O₃ (ohne Abbildung) liegen im Bereich < 10 mg/l.

Die höchsten Alkaliegehalte in der Porenlösung verbunden mit den höchsten pH-Werten weisen die Traßkalke und der Flugaschzement auf.

Durch die Hydratation bei höheren Temperaturen (25°C) steigt die Löslichkeit aller Komponenten gegenüber der Hydratation bei 5°C. Das betrifft erstaunlicherweise auch die CaO-Löslichkeit. Trotz teilweiser Erhöhung des Alkaliegehaltes bei Gipszugabe (25°C), sinken die pH-Werte gegenüber den Proben ohne Sulfatquelle ab.

Auffällig ist, daß die Porenlösung beim HAZ, den beiden Hüttensanden und der untersuchten SFA bereits ohne Sulfatzufuhr mit Calciumsulfat übersättigt ist (Löslichkeit von Gips bei 20°C: 2050 mg CaSO₄/l Wasser = 1207 mg SO₃/l; Anhydrit: 1900 mg CaSO₄/l Wasser = 1117 mg SO₃/l). Das bedeutet, daß auch eine weitere Sulfatzufuhr, z.B. durch Kontakte mit Gipsmörtel im Bauwerksinneren, die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion mit mobilen Al₂O₃-haltigen Komponenten nicht erhöht. Das wird auch durch die phasenanalytischen Untersuchungen bestätigt. Sowohl beim HAZ als auch bei der SFA tritt Ettringit als primäres Erhärtungsprodukt bei Wasserlagerung auf, dessen Gehalt sich durch weitere Sulfatzufuhr nur geringfügig erhöht (siehe DTA-Kurvenvergleich des HAZ bei NE, innerem und äußerem Sulfatangriff, A13 im Anhang).

Die Gipszugabe bewirkt - außer beim Hüttensand Dortmund - eine deutliche Reduzierung des löslichen Al₂O₃-Gehaltes. Besonders ausgeprägt ist diese Abnahme des Al₂O₃-Gehaltes korrelierend mit zunehmenden Ettringitgehalten beim TUBAG und beim TK Meurin (siehe DTA-Kurvenvergleich des TK Meurin, A14 im Anhang).

Die Tabellen A27 bis A39 im Anhang zeigen den phasenanalytisch bestimmten, durch inneren und äußeren Sulfatangriff veränderten Mineralbestand.

Die Seiten 170 ff. veranschaulichen im Überblick die Ergebnisse des Auspressens der Porenlösung nach Normalerhärtung und innerem Sulfatangriff, der Untersuchungen zum äußeren Sulfatangriff in Anlehnung an das KOCH-STEINEGGER-Verfahren

sowie der phasenanalytischen Untersuchungen bei Normalerhärtung, innerem und äußerem Sulfatangriff.

Bild 120: CaO-Gehalte der Porenlösung mit und ohne innere Sulfatquelle bei 5°C und 25°C

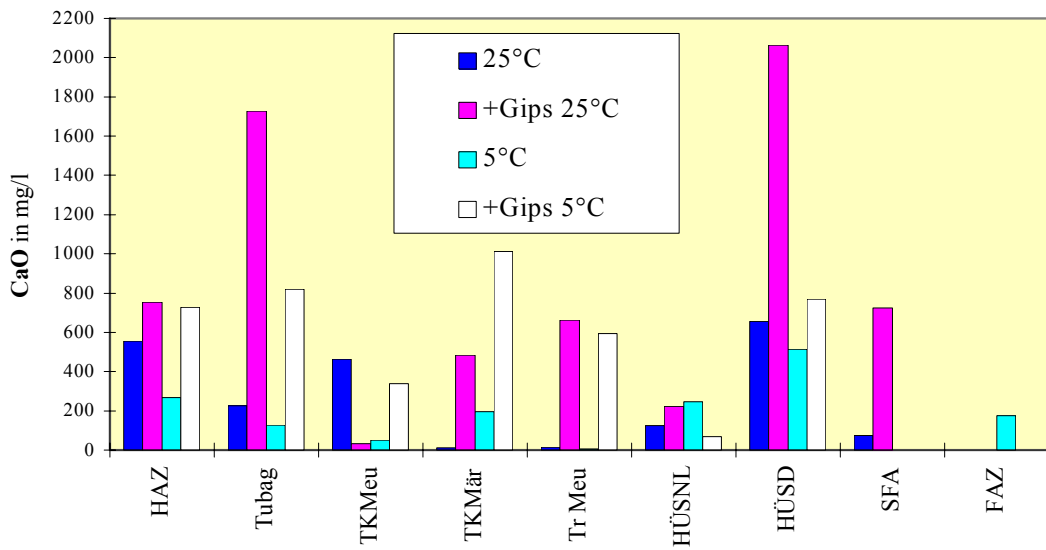


Bild 121: Al₂O₃-Gehalte der Porenlösung mit und ohne innere Sulfatquelle bei 5°C und 25°C

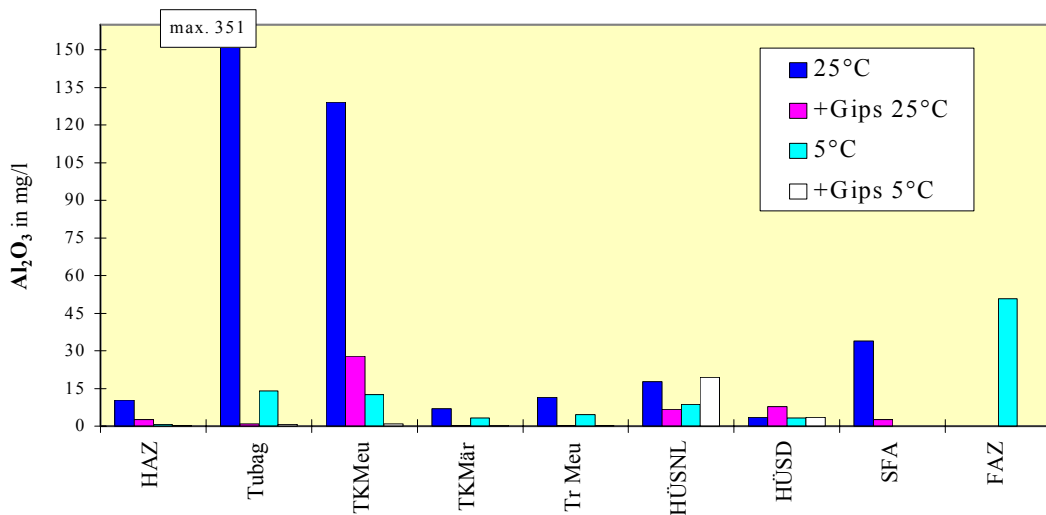


Bild 122: SO₃-Gehalte der Porenlösung mit und ohne innere Sulfatquelle bei 5°C und 25°C

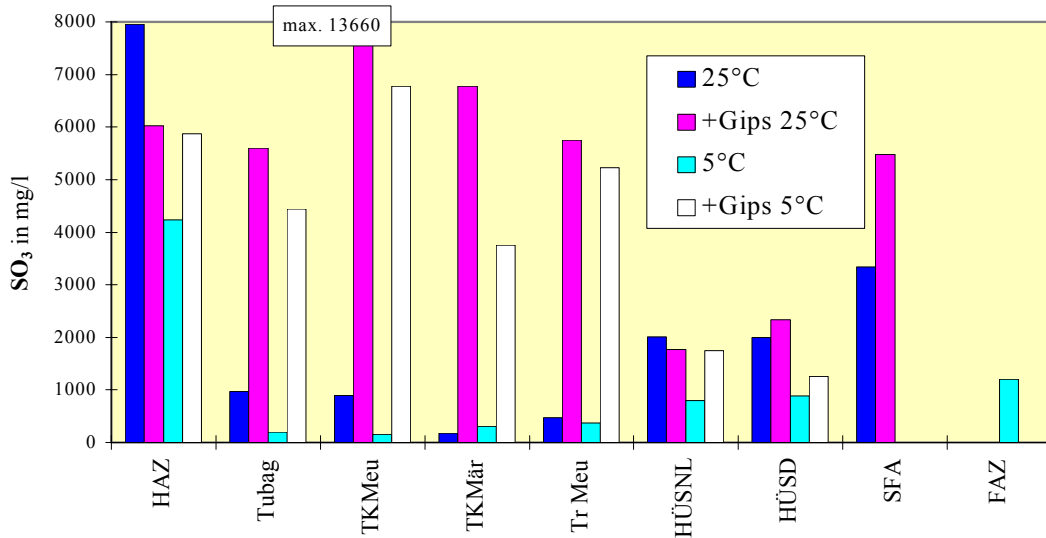


Bild 123: K₂O-Gehalte der Porenlösung mit und ohne innere Sulfatquelle bei 5°C und 25°C

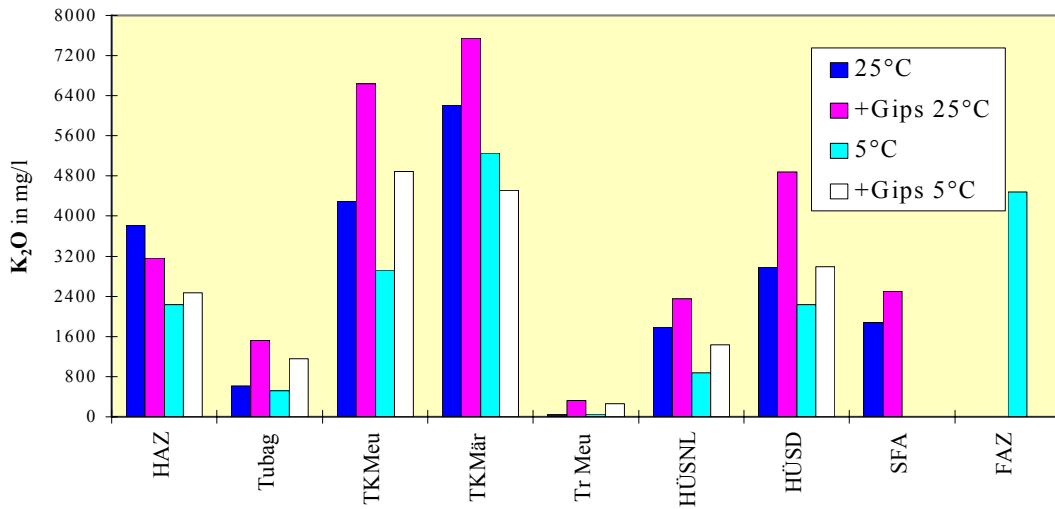


Bild 124: Na₂O-Gehalte der Porenlösung mit und ohne innere Sulfatquelle bei 5°C und 25°C

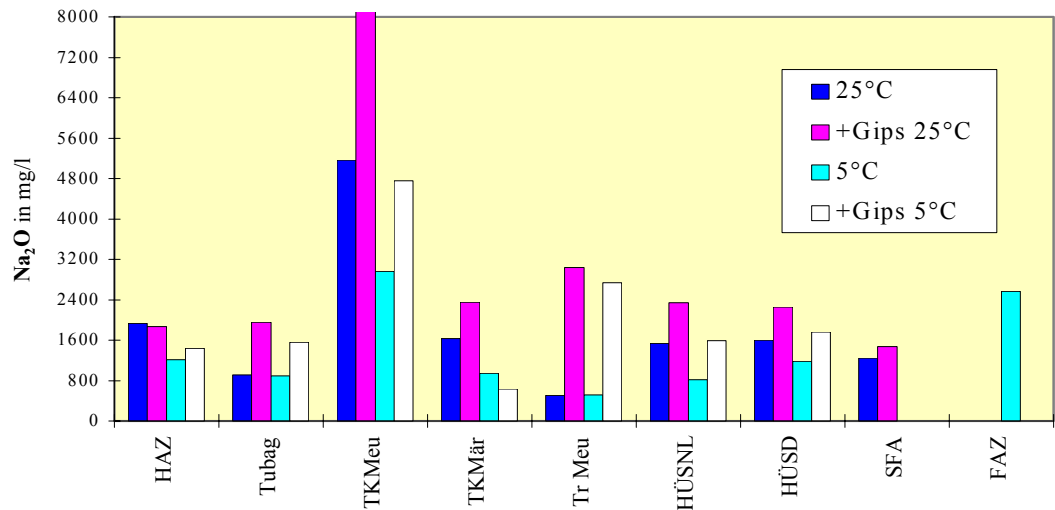
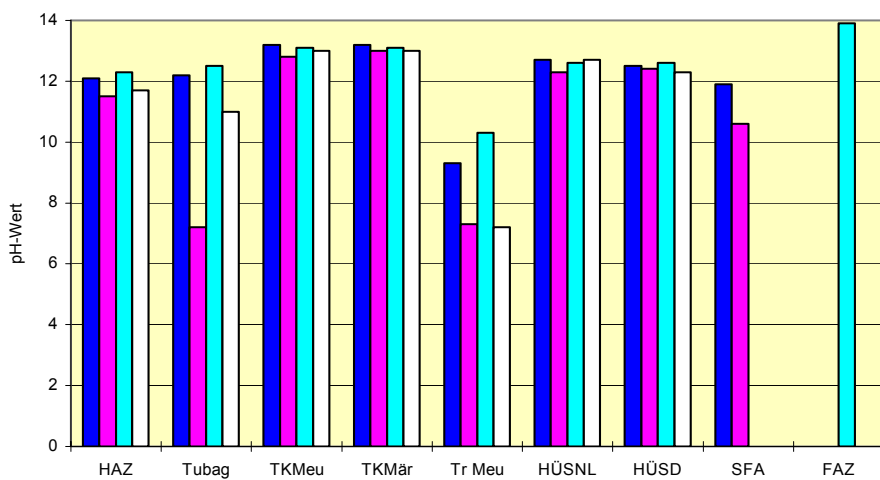


Bild 125: pH-Werte der Porenlösung mit und ohne innere Sulfatquelle bei 5°C und 25°C



□ Traub Meurin

pH-Wert:	9,3/10,3 (5°C/25°C) +Gips 7,2/7,3
löslich: Al ₂ O ₃	↓
SO ₃	+Gips ↑↑
Alkalien	↓; +Gips ↑
indirek. Sulf.-aufn.:	n.b.
vis. Begutachtung ¹⁾ :	Auflöseerscheinung
Ettringit:	-
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Verfestigung:	nein

□ Traub-Kalk Meurin

pH-Wert:	13,1/13,2 +Gips 12,8/13,0
löslich: Al ₂ O ₃	25°C ↑↑ +Gips 5°C ↓↓
SO ₃	+Gips ↑↑ 25°C > 5°C
Alkalien	↑↑ K ₂ O+Na ₂ O; +Gips >NE 25°C > 5°C
indirek. Sulf.-aufn.:	↑
vis. Begutachtung:	tiefe und breite Risse
Ettringit:	+ +Gips,SL > NE
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Verfestigung:	ja

□ Tubag 393

pH-Wert:	12,2/12,5 +Gips 11,0/6,2
löslich: Al ₂ O ₃	↑; +Gips ↓↓
SO ₃	+Gips ↑ 25°C > 5°C
Alkalien	↔; +Gips > NE
indirek. Sulf.-aufn.:	↓...↔
vis. Begutachtung:	Risse an Ecken u. Kanten
Ettringit:	+; +Gips ↑
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Verfestigung:	ja

□ Traub Märker

pH-Wert:	n.b.
löslich: Al ₂ O ₃	n.b.
SO ₃	n.b.
Alkalien	n.b.
indirek. Sulf.-aufn.:	n.b.
vis. Begutachtung:	Auflöseerscheinung
Ettringit:	-
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Verfestigung:	nein

□ Traub-Kalk Märker

pH-Wert:	13,1/13,2 +Gips 12,9/13,0
löslich: Al ₂ O ₃	25°C ↑↑ +Gips 5°C ↓↓
SO ₃	+Gips ↑↑ 25°C > 5°C
Alkalien	↑↑; 25°C > 5°C K ₂ O > Na ₂ O
indirek. Sulf.-aufn.:	↑↑
vis. Begutachtung:	Auflöseerscheinung
Ettringit:	nur +Sulfat SL > +Gips
Monosulfat:	-
Thaumasit:	+ nur +Gips
Verfestigung:	ja

□ Hüttensand Dortmund

pH-Wert:	12,6/12,5 +Gips 12,3/12,4
löslich: Al ₂ O ₃	⇔
SO ₃	⇔; 25°C > 5°C
Alkalien	↑ +Gips > NE 25°C > 5°C
indirek. Sulf.-aufn.:	↓
vis. Begutachtung:	bestanden
Ettringit:	+ nur +Gips
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Vaterit:	+ bei WL
Verfestigung:	ja

□ HAZ

pH-Wert:	12,3/12,1 11,7/11,5
löslich: Al ₂ O ₃	↓; 25°C -Gips ⇔
SO ₃	↑↑; 5°C NE ⇔
Alkalien	⇔...↑; 25°C > 5°C
indirek. Sulf.-aufn.:	↓
vis. Begutachtung:	bestanden
Ettringit:	+
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Verfestigung:	ja

□ SFA Altbach

pH-Wert:	11,9 (nur 25°C) +Gips 10,6 (nur 25°C)
löslich: Al ₂ O ₃	⇔; NE ↑
SO ₃	↑
Alkalien	⇔...↑
indirek. Sulf.-aufn.:	n.b.
vis. Begutachtung:	Auflöseerscheinung
Ettringit:	+
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Verfestigung:	nein

□ Hüttensand Niederlande

pH-Wert:	12,6/12,7 +Gips 12,7/12,3
löslich: Al ₂ O ₃	⇔
SO ₃	⇔; 5°C NE ↓
Alkalien	⇔ +Gips > NE 25°C > 5°C
indirek. Sulf.-aufn.:	↓
vis. Begutachtung:	bestanden
Ettringit:	bei +Sulfat +Gips > SL
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Vaterit:	+ bei WL
Verfestigung:	ja

□ CEM III/B 32,5-NW/HS

pH-Wert:	n.b.
löslich: Al ₂ O ₃	n.b.
SO ₃	n.b.
Alkalien	n.b.
indirek. Sulf.-aufn.:	↓...⇔
vis. Begutachtung:	bestanden
Ettringit:	+
Monosulfat:	+ nur SL
Thaumasit:	-
Verfestigung:	ja

□ CEM II/A-V 32,5 R

pH-Wert:	13,9 (nur 5°C)
löslich: Al ₂ O ₃	↑↑
SO ₃	↑
Alkalien	⇔
indirek. Sulf.-aufn.:	⇔
vis. Begutachtung:	bestanden
Ettringit:	+ Sulfat und WL
Monosulfat:	+ bei WL und SL (Gipsbildung)
Thaumasit:	-
Verfestigung:	ja

□ **CEM I 42,5 R**

pH-Wert:	n.b.
löslich: Al ₂ O ₃	n.b.
SO ₃	n.b.
Alkalien	n.b.
indirek. Sulf.-aufn.:	⇔
vis. Begutachtung:	bestanden
Ettringit:	+ bei Sulfat und WL
Monosulfat:	-
Thaumasit:	-
Verfestigung:	ja

□ **CEM I 42,5 R-HS**

pH-Wert:	n.b.
löslich: Al ₂ O ₃	n.b.
SO ₃	n.b.
Alkalien	n.b.
indirek. Sulf.-aufn.:	⇔
vis. Begutachtung:	bestanden
Ettringit:	+ bei Sulfat und WL
Monosulfat:	+ bei SL
Thaumasit:	-
Verfestigung:	ja

NE ... Normalerhärtung bei 5 °C und 25 °C (in abgeschlossenen Flaschen)

WL ... Wasserlagerung bei 5 °C und 25 °C

SL ... Sulfatlagerung = äußerer Angriff

+Gips ... Gipszugabe = innerer Angriff

↑ ... hoch

↑↑ ... sehr hoch

↓ ... niedrig

↓↓ ... sehr niedrig

⇔ ... mittel

n.b. ... nicht bestimmt

- ... nicht nachgewiesen

+ ... nachgewiesen

1) ... nach äußerem Angriff; 28 d Wasser- danach 56 d Sulfatlagerung

6 Applikation eines optimierten Injektionsschaummörtels an einem historischen Mauerwerk

6.1 Objektbeschreibung der Schönburg bei Naumburg

Die Schönburg bei Naumburg in Sachsen-Anhalt ist ein romanischer Profanbau aus dem 12./13. Jahrhundert, der 70 Meter über dem Saaletal auf einem steil abfallenden Sandsteinfelsen erbaut wurde (Bild 126 Luftaufnahme). Die trapezförmige Burganlage besteht aus Vorburg und Hauptburg mit Burgfried und Resten einer Kapelle sowie eines zweigeschossigen Palas. Die Burganlage ist umgeben von einer dreischaligen, 1,5 Meter starken und 8 bis 12 Meter hohen Ringmauer. Diese folgt dem Rand des Hügels auf dem Sandsteinfelsen.



Ursprünglich als Schutzburg gegen die Slawen erbaut, diente sie später als Sommerresidenz der Bischöfe von Naumburg. Der folgenden geschichtlichen Bedeutungslosigkeit ist einerseits die Erhaltung großer Teile der Befestigungsanlage in ursprünglichem Zustand zu verdanken. Andererseits wurde die lange Zeit herrenlose Burg von den Bewohnern der Umgebung als „Steinbruch“ und Müllhalde genutzt, was dazu führte, daß heute teilweise Sandsteine fehlen und die Erde im Burghof sowie bestimmte Bereiche der Ringmauer und des Burgfriedes stark salzbelastet sind. Der desolante Zustand der Ringmauer äußerte sich vor allem an der Westseite der Burg durch starkes Absanden der Mauersteine, Lücken in der Außenschale, bereits mit bloßem Auge sichtbare

Versalzung des Fugenmörtels und der Sandsteine sowie biologischem Angriff von mikrobiellem Befall bis hin zum Bewuchs. Die starke Versalzung und Verwitterung, wechselnde statische Belastungen und unbehinderter Feuchteintrag in das Mauerwerk beeinträchtigten die Standsicherheit der Befestigungsmauer lokal derart, daß es im November 1991 an der Nordwestseite zu einem teilweisen Einsturz kam.

6.2 Erfassung des baustofflichen Ist-Zustandes der Ringmauer

Im Rahmen der Sanierung der Ringmauer sollten neben dem Einsetzen der fehlenden bzw. völlig verwitterten Sandsteine und der Neuverfugung die Hohlräume im dreischaligen Mauerwerk mit Schüttkern geschlossen werden. Das erforderte eine sorgfältige Erfassung des baustofflichen Ist-Zustandes mit Untersuchung der Mörtel,

der Sandsteine und der Salzbelastung. Dabei zeigte sich, daß der historische Kalkmörtel und die Sandsteine stark mit Kaliumnitrat und z.T. auch mit verschiedenen Alkali- und Erdalkalisulfaten (u.a. Gips und Langbeinit) belastet sind. Gemeinsam mit den überwiegend leicht löslichen Salzen wurden auch Mörtel- und Sandsteinpartikel abgetragen, insbesondere in den Bereichen, wo die Vorderschale fehlte und die Feuchtigkeit dauerhaft freien Zutritt hatte.

Tabelle 57 zeigt die Sulfat- und Nitratgehalte von Mörtelproben der Ringmauerwestseite. In bestimmten Bereichen betrug der Versalzungsgrad des Bindemittels bis zu 70 %, so daß die Mörtelbindekraft derart beeinträchtigt wurde, daß z.T. nur noch loser Sand oder Hohlräume im Mauerwerksinneren vorhanden waren.

Tabelle 57: Wasserlösliche Sulfat- und Nitratgehalte von Mörtelproben der Ringmauerwestseite (% der Gesamtprobe)

%/Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SO ₃	1,0	2,1	0,4	1,1	1,8	2,0	1,0	0,3	1,6	1,6	2,0	2,3
NO ₃ ⁻	1,50	0,27	28,9	0,85	1,07	4,77	1,52	0,79	8,52	7,68	3,66	25,6

Bei der Sanierung des dreischaligen Mauerwerkes an der Ringmauerwestseite standen neben den statischen Sicherungsmaßnahmen im Einsturzbereich folgende Anforderungen:

- Abtragen bzw. Absaugen der losen Bestandteile aus dem Mauerwerksinneren und den Fugen
- Schließen der Außenschale durch wiederverwendbare oder neue Sandsteine
- Neuverfugung des Mauerwerkes
- Hohlraumausfüllung zwischen den Schalen mit gutem Verbund des Injektionsmörtels zum Sandstein und den Resten des Mörtels im Mauerwerk
- angepaßte Festigkeiten und Elastizitätsmoduln des Injektionsmörtels
- Verträglichkeit des Mörtels mit den im Mauerwerk vorhandenen Salzen, die nicht entfernt und durch das Mörtelanmachwasser mobilisiert werden können
- minimale Masseerhöhung bei optimaler Hohlraumausfüllung und geringer Druckaufbau bei der Injektion, um das standsicherheitsgefährdete Mauerwerk nicht noch zusätzlich zu belasten
- minimaler Wassereintrag, da die Sandsteineigenschaften wie Festigkeit und Verwitterungsbeständigkeit bei Durchfeuchtung beeinträchtigt und die Salze wieder gelöst und mobilisiert werden

Diesen Anforderungen wird der Injektionsschaummörtel eher gerecht als herkömmliche Injektionsmörtel.

6.3 Rezepturauswahl

Nach Verträglichkeitsuntersuchungen unterschiedlicher Bindemittel mit KNO₃ (10 % bezogen auf das BM), bei denen die Dehnungen in Gegenwart des Salzes als auch der

Einfluß auf die Festigkeitsentwicklung untersucht wurden (siehe Tabelle 58), wurde ein C₃A-armes Portlandzement CEM I 42,5 R-HS für die Injektionen ausgewählt. Sowohl die Dehnung als auch die Festigkeitsverluste in Gegenwart des KNO₃ waren bei dem Schaummörtel geringer als bei dem CEM I 42,5 R-HS-Injektionsmörtel ohne Schaum.

Rezeptur:

Bindemittel: CEM I 42,5 R-HS
 Wasser-Bindemittel-Wert: 0,5
 Verhältnis Bindemittelleim : Schaum: 2 : 1,5
 Schaumbildner: SB 2
 Stabilisierer: ST 2, 0,8 % bezogen auf das Bindemittel

Tabelle 58: Festigkeitsrückgang in Gegenwart von KNO₃ in %

		CEM I 42,5 R-HS			CEM I 42,5 R-HS-SM		
		4 d	7 d	28 d	4 d	7 d	28 d
β _D	20/95	57	54	50	45	44	39
β _{BZ}	20/95	46	39	24	33	27	15

6.4 Injektion

Für die ersten Injektionen am genannten Objekt wurde eine Testfläche von ca. 10 m² an der westlichen Ringmaueraußenseite ausgewählt (Bild 127). Vor der Neuverfugung (Handverfugung mit Sumpfkalkmörtel) wurden durch Mitarbeiter der Fa. Finke&Freiberg die losen Bestandteile aus dem Mauerwerksinneren mit einem Industriesauger abgesaugt und die fehlenden Sandsteine eingesetzt. Die nicht frei zugängigen Mauerwerksbereiche wurden mit dem Endoskop untersucht, u.a. um geeignete Stellen für die Injektionspacker (Stahlrohre mit d_i = 20 mm) auszuwählen. Die Testinjektionen erfolgten im August 1992 (Bild 128). Der Schaummörtel wurde mit einem Collomatic-Rührgerät (Bild 128) gemischt und mit einer Schraubenpumpe (Bild 127) über Kunststoffschläuche ins Mauerwerk injiziert.

Bild 127: Testfläche mit Packern und Schraubenpumpe



Bild 128: Während der Injektion



6.5 Injektionskontrolle

Die Qualitätsüberwachung des Schaummörtels während der Applikation erfolgte anhand der Bestimmung der Frischmörtelrohichte. Sie lag zwischen $0,75$ und $0,78$ g/cm^3 . Zur Erfassung der Festigkeitsentwicklung des Schaummörtels sowie des Verbundverhaltens zum Sandstein wurden vor Ort Schaummörtelprismen und Verbundkörper hergestellt, die vor Schlagregen geschützt bis zur Prüfung neben der Testfläche lagerten. Zusätzlich erfolgte die Kontrolle der Festigkeitsentwicklung des Schaummörtels im Mauerwerksinneren im Kontakt zu allen Mauerwerksbaustoffen unter Einwirkung der realen Mauerfeuchte und -temperatur, der Salze, der Wasseraufnahme der Sandsteine und historischen Kalkmörtel usw. anhand von Bohrkernen ($\text{Ø} = 10$ cm), aus denen Zylinder mit 5 cm Durchmesser entsprechend der Belastungsrichtung am Bauwerk herausgebohrt wurden. Die Bohrkern wurden 5 und 14 Tage nach der Injektion entnommen. Bild 129 zeigt einen Bohrkern aus der Testfläche direkt nach der Naßbohrung. In Bild 130 ist der Querschnitt diese Bohrkernes mit beeindruckendem Verbund der Original- und der neu eingebrachten Mauerwerksbaustoffe dargestellt. Sowohl der Zustand der Bohrkern als auch die Endoskopieuntersuchungen in den Bohrlöchern lassen auf einen gute Hohlraumausfüllung und eine guten Haftverbund des Schaummörtels zum Sandstein und zum Fugenmörtel schließen. An den vor Ort gelagerten Verbundkörpern aus

Schaummörtel und Sandstein wurde eine sehr gute Haftzugfestigkeit von 0,5 N/mm² im Mittel gemessen.

Bild 129: Bohrkern direkt nach der Entnahme



Bild 130: Bohrkern im Querschnitt

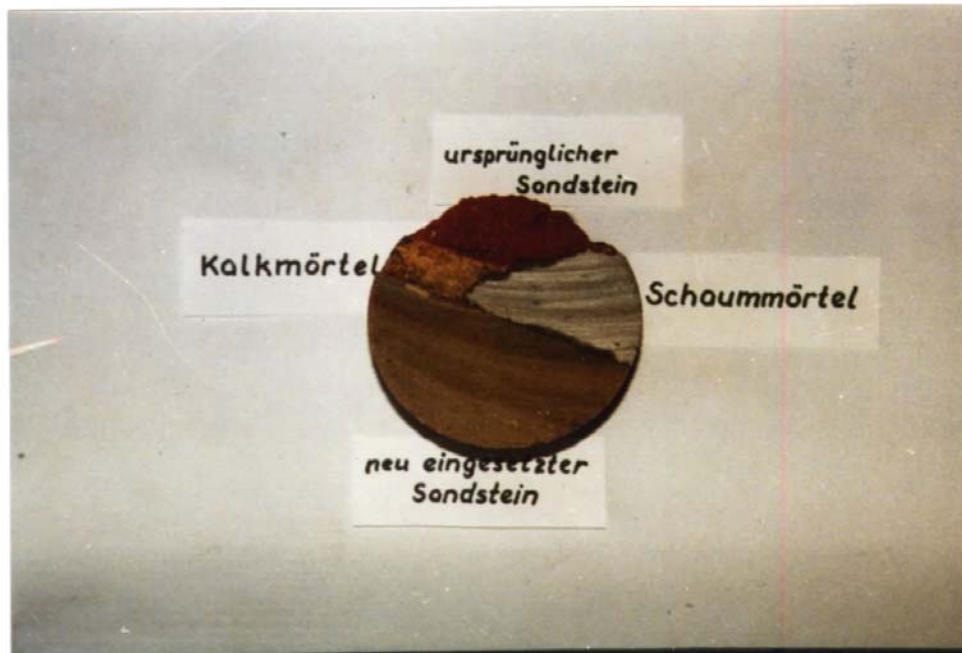


Bild 131 zeigt die Druckfestigkeitsentwicklung des applizierten Schaummörtels aus dem Mauerwerksinneren und der Prüfkörper aus dem selben Schaummörtel, die vor Ort lagerten. Die Prismendruckfestigkeiten wurden dabei mit Hilfe eines labormäßig bestimmten Faktors in Zylinderdruckfestigkeiten umgerechnet.

Die zweite Injektionskontrolle erfolgte im April 1994 nach ca. 600tägiger Standzeit des Injektionsmörtels mit zwei Frostperioden. Die Bohrkernentnahme erfolgte nicht wie bei der ersten Kontrolle von der Maueraußenseite aus (in Injektionsrichtung), sondern von der Burgvorhoffinnenseite. Da das Niveau des Burgvorhofes höher liegt, mußte dazu eine Schurfgrube von ca. einem Meter Tiefe angelegt werden (Bild 132).

Bild 131: Druckfestigkeitsentwicklung des Schaummörtels im Mauerwerk und bei Lagerung vor Ort

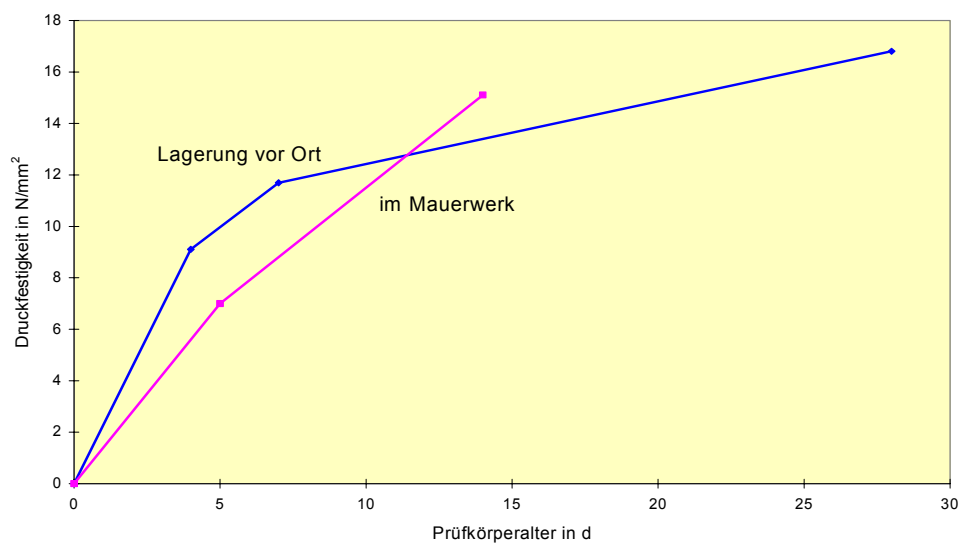


Bild 132: Schurfgrube im Burgvorhof



Bild 133: Bohrkern 5



Tabelle 59: Ausgewählte Klimadaten des Wetteramtes Weimar

Winter 1992/1993	
Anzahl Frosttage	46 davon 13 mit Temperaturen im Tagesmittel < -5 °C
FTW	59
Tiefste Tagesmitteltemperatur	-14,2 °C
Winter 1993/1994	
Anzahl Frosttage	31 davon 19 mit Temperaturen im Tagesmittel < -5 °C
FTW	31
Tiefste Tagesmitteltemperatur	-13,5 °C

Bei zwei Bohrkernen wurde Injektionsschaummörtel nachgewiesen. Zur Bestimmung der Festmörtelkennwerte des Schaummörtels (Tabelle 60) wurden aus dem Bohrkern 5 mit 10 cm Durchmesser (Bild 133) Zylinder mit $\varnothing = 5$ cm herausgebohrt und anschließend auf eine Höhe von $h = 5$ cm gesägt.

Tabelle 60: Festmörtelkennwerte des ISM nach 600 Tagen Standzeit am Objekt

BK-Abschnitt	ρ_{af} in kg/dm^3	$\rho_{40^\circ\text{C}}$ in kg/dm^3	ρ_{rein} in kg/dm^3	GP in %	β_D in N/mm^2
4.3	1,14	0,99	2,31	57	11,8
4.4	1,13	0,99	2,31	57	17,1
5.2	1,13	0,99	2,36	58	10,2
5.3	1,15	1,01	2,36	57	19,2

Da die Haftzugfestigkeit zwischen dem Injektionsschaummörtel und dem Sandstein aufgrund unzureichender Probekörperabmessungen nicht bestimmt werden konnte, wurde der Verbund anhand lichtmikroskopischer Untersuchungen beschrieben. Einen

Eindruck davon vermitteln die Bilder 134 und 136. Es wurde nicht nur eine nahtloser Haftverbund erzielt (Bild 134), sondern ein Teil des ISM drang sogar in Risse und Klüfte des Sandsteines ein (Bilder 135 und 136).

Zur Untersuchung der Hydratation des ISM im Mauerwerksinneren und der Salzbelastung wurden verschiedene chemisch-mineralogische Untersuchungen durchgeführt (Tabelle 61).

Tabelle 61: Phasenzusammensetzung und Gehalte an wasserlöslichen Salzen der ISM-Proben

BK-Abschnitt	C-S-H-Phasen	Klinkerphasen C ₃ S ₂ ,C ₄ AF	Portlandit Ca(OH) ₂	Calcit CaCO ₃	Sulfat in %	Chlorid in %	Nitrat in %	pH-Wert
4.4	+++	+	++	+	-	-	0,135	12,4
5.2	+++	+	++	+	-	-	0,024	12,4
5.3	+++	+	++	+	-	-	0,033	12,4

Bei den Schaummörtelproben dominieren erwartungsgemäß die C-S-H-Phasen und Portlandit. Der Calcit wurde wahrscheinlich durch den kontaktierenden Kalkmörtel eingebracht. Es ist weniger anzunehmen, daß er durch Karbonatisierung aus dem Calciumhydroxid des Zementsteines gebildet wurde.

Die Salzbelastung, die vor den Injektionen an gleicher Stelle der Ringmaueraußenseite an Oberflächenproben bestimmt wurde (Chlorid = 0,275 - 0,310 %, Nitrat = 0,85 - 1,07 %, Sulfat = 1,10 - 1,80 %), war wesentlich höher. Wahrscheinlich haben neben dem klimaabhängigen Feuchtetransport an die Mauerwerksoberfläche auch das Absaugen des losen Materials, der teilweise Steinaustausch sowie die Neuverfugung dazu beigetragen, den Salzgehalt im Mauerwerksinneren zu senken.

Bei der Injektionskontrolle zeigte sich, daß die projektierte Druckfestigkeit (ca. 10 N/mm²) erreicht wurde. Die Verbunduntersuchungen ergaben einen nahtlosen Verbund und eine innige Verzahnung des ISM sowohl mit den Sandsteinen als auch mit dem Kalkmörtel. Fehlstellen der kontaktierenden Sandsteinbereiche wurden teilweise mit ISM gefüllt, was partiell zu einer Vergütung des Mauerwerksgefüges führte.

Es kann festgestellt werden, daß der ISM auf HS-Zementbasis im Mauerwerksinneren der Ringmauer der Schönburg seine Funktion bisher uneingeschränkt erfüllt und keine Veränderungen durch Witterungseinflüsse und/oder die Salzbelastung erfahren hat.

Bild 134: Phasengrenzfläche zwischen Schaummörtel und Sandstein in 8facher Vergrößerung

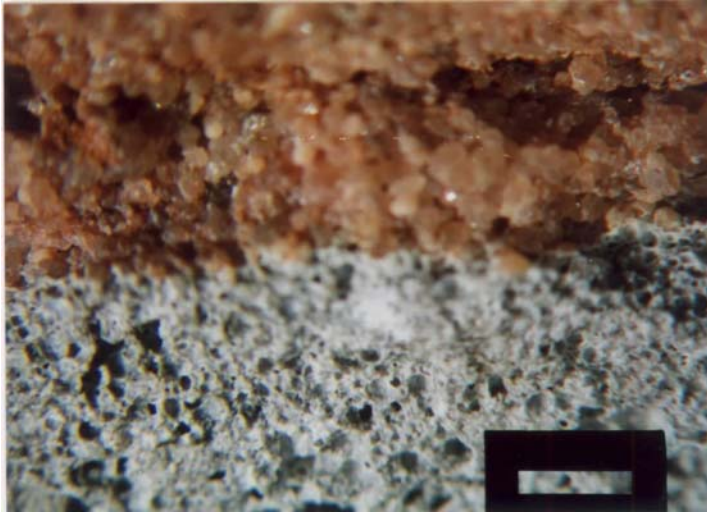


Bild 135: Schaummörtel in Rissen des Sandsteines



Bild 136: Schaummörtel in Rissen des Sandsteines in 8facher Vergrößerung



7 Anwendungsgebiete und Einsatzgrenzen des Injektionsschaummörtels

7.1 Anwendungsgebiete allgemein

Den Injektionsmörteln kommt im Bereich der Instandsetzungsmörtel aufgrund ihrer speziellen Funktion am und im Mauerwerk eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu anderen Mörteln wie Putzen oder Fugenmörteln ist ihr Verhalten während der Verarbeitung, Erstarrung und Erhärtung sowie auch der Verwitterung (durch die Einflüsse im Mauerwerksinneren wie Feuchte- und Salztransportvorgänge und Dehnungen: hygri-sch, thermisch oder chemisch bedingt) nicht direkt beobachtbar. Ab dem Zeitpunkt des Injizierens ins Mauerwerk ist der Mörtel der visuellen Kontrolle des Ausführenden und ggf. einer Einflußnahme entzogen, d.h. die Zusammensetzung kann nicht mehr korrigiert werden. Darüber hinaus sind Injektionsmörtel - im Gegensatz zu o.g. Mörtel - weitgehend irreversibel. Das liegt zum einen an der Verteilung des Injektionsmörtels im Mauerwerksinneren mit einer Vielzahl an Kontaktflächen zur vorhandenen Bausubstanz (Mauersteine, Originalmörtel, ggf. Mörtel aus früheren Sanierungsmaßnahmen) und zum anderen daran, daß selbst bei Einsatz moderner Analytik (Endoskopie, Georadar, Ultraschall etc.) nicht alle injizierten Bereiche lokalisiert werden können. Häufig durchzieht der Injektionsmörtel wie feine Adern den gesamten injizierten Mauerwerksabschnitt (siehe z.B. Bild 11). Dieses „Black-Box-Verhalten“ und die Irreversibilität stellen daher besondere Anforderungen an die Rezepturentwicklung und -auswahl in Anpassung an die Gegebenheiten des Mauerwerkes. Das ist auch ein Grund dafür, daß bei Injektionsmörteln die Baustellenmischungen gegenüber Werkmörteln oder Werk trockenmörteln dominieren. Besondere Anforderungen sind auch an die Überwachung der Frischmörteleigenschaften zu stellen, nicht nur im Sinne optimaler Verarbeitungseigenschaften wie gute Pump- und Fließfähigkeit sowie geringe Entmischungsneigung, sondern auch im Hinblick auf die Festmörteleigenschaften, die sich nach Erreichen des Bestimmungsortes im Mauerwerksinneren ausbilden sollen. Genaue Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Frisch- und Festmörteleigenschaften sind deshalb unumgänglich.

Mit dem Schaummörtel wurde ein mineralisches Mörtelsystem entwickelt und bis zur Anwendungsreife optimiert, mit dem durch Variation des Schaumanteiles und in geringem Maß auch durch Variation des W/B-Wertes bessere Anpassungsmöglichkeiten an das zu sanierende Mauerwerk möglich sind als bei herkömmlichen mineralischen Injektionsmörteln. Letztgenannte Mörtel auf Zementbasis sind mit ihren Eigenschaften häufig überdimensioniert und können u.U. eine zusätzliche Belastung, insbesondere für Mauerwerk niedriger Festigkeit, darstellen. Bei Injektionsmörteln auf Traßkalk- oder Traßzementbasis ist das zwar nicht der Fall, hier gibt es jedoch in der Praxis häufig Probleme, zurückzuführen auf unzureichende Erhärtung (insbesondere bei niedrigen Temperaturen und wenn die Überschußfeuchte nicht entweichen kann) und Unverträglichkeit mit den bauwerkseigenen Salzen.

Der Injektionsschaummörtel kann für folgende Sanierungsaufgaben eingesetzt werden:

- Erhöhung der Mauerwerksstabilität (Hohlraumverfüllung, Spaltinjektion)
- Verbesserung der Tragfähigkeit, z.B. von Fundamenten
- Mauerwerksvergütung in Verbindung mit Vernadelungs- oder Verankerungsarbeiten
- Hohlraumausfüllung vor Mauerwerksinjektionen zur Reduzierung der aufsteigenden Feuchtigkeit
- partielle Befestigung loser Mörtel, z.B. Putz am Putzgrund [34]

7.2 Anwendungsbeispiele an Objekten in Thüringen und Mecklenburg-Vorpommern

7.2.1 Barbarossaturm auf dem Kyffhäuser bei Bad Frankenhausen

Der Barbarossaturm auf dem Kyffhäuser bei Bad Frankenhausen (Thüringen) wurde in der Romanik aus Sandsteinbuckelquadern (Bild 139) und Gipsmörteln errichtet und hatte einen Grundriß von 10,2 m × 10,8 m bei 2,8 m Mauerstärke.

Der Architekt Herr Wagner beschreibt den Zustand vor der Sanierung 1992 in der folgenden Weise [62]: In den letzten zwei oder drei Jahrzehnten war die Silhouette des Kyffhäuser-Berges durch die immer bizarrer werdende Gestalt der Ruine des Turmes geprägt, der - obwohl schon mehr als ein Drittel seiner ursprünglichen Höhe verloren ging - immer noch ein eindrucksvoller Zeuge der einst mächtigen Festungsanlage Oberburg Kyffhausen ist. Geheimrat Goethe war als wohl bedeutendster Liebhaber mediterraner Ruinenromantik von der Form, die der Zahn der Zeit in das romanische Mauerwerk genagt hatte, sehr angetan. Der obere Bereich des Turmes hatte die Form einer verwelkenden Tulpe angenommen. Bild 137 zeigt einen Blick von oben in den Turm vor der Sanierung. Die oberen Mauerwerksbereiche bogen sich nach außen. Vier der in den 30er Jahren installierten Zuganker waren gerissen, zwei andere besaßen keine Widerlager mehr und hatten sich durch das Mauerwerk gezogen.

Bild 137: Blick von oben in den Turm vor der Sanierung [62]



Der „morbid Charm des Verfalls“ wird jedoch fraglich, wenn der Zustand des Bauwerkes zu einer Gefahr wird. Nach dem Herabfallen von Steinen der Mauerkrone im Jahr 1992 erfolgte eine detaillierte Begutachtung der Schäden durch Kranbefahrung. Die Untersuchungen ergaben, daß der Turm durch folgende Phänomene gefährdet wurde:

- die starke Erosion, die vor allem beim freiliegenden Verfüllmauerwerk einen schnellen

 - Substanzverlust bewirkte

- die Schiefstellung der Mauerwerkspfeiler auf der Süd- und Westseite des Turmes

 - Die Verformung sich nach außen biegender Mauerwerkspartien war so weit geschritten,

 - daß mit einem Absturz gerechnet werden mußte. Der dadurch eintretende Verlust an Mauerwerk wurde auf 500 t geschätzt.

- Auch an der Nordostecke drohte ein erheblicher plötzlicher Substanzverlust, der noch weitere unkalkulierbare Veränderungen der Gestalt des Bauwerkes hätte auslösen können.

Als Schadensursachen dieses extrem exponierten Bauwerkes werden die dauerhafte Einwirkung von Feuchtigkeit und Frost sowie Temperaturspannungen und Windbelastungen bei fehlender Baupflege genannt. Gründungsschäden wurden nicht festgestellt, der Turm steht auf festem felsigem Grund. Auch Feuchtestaus schied als Schadensursache aus, da die Niederschläge durch vorhandene Felsspalten abgeleitet werden.

Es erfolgte eine Notsicherung durch Umschnürung des Turmes mit Stahlseilen und Einhüllung der Nordostecke mit einer Holzkonstruktion. Trotzdem stand weiterhin die Frage, wie das erheblich verformte Bauwerk prinzipiell gesichert werden kann. Es wurden mehrere Varianten diskutiert, die jedoch u.a. wegen zu hoher Kosten oder zu hoher Verluste an Originalsubstanz nicht zufriedenstellend waren. Durch Herrn Dr. Bennert von der gleichnamigen Firma für Bauwerkssicherung wurde die Idee geboren, die Schiefelage der oberen Mauerwerkspartien zu korrigieren, in dem man sie nach innen kippt - eine Verfahren, für das es bis dahin kein Beispiel gab. Damit verbunden wurden folgende Sicherungsarbeiten notwendig:

- Zusammenfassen der inneren und äußeren Schale durch Edelstahlnadeln

- Schaffung eines Ringschlusses durch Einbohren von Ankerlagen aus Edelstahl zur Verhinderung des Auseinanderfallens des Turmes

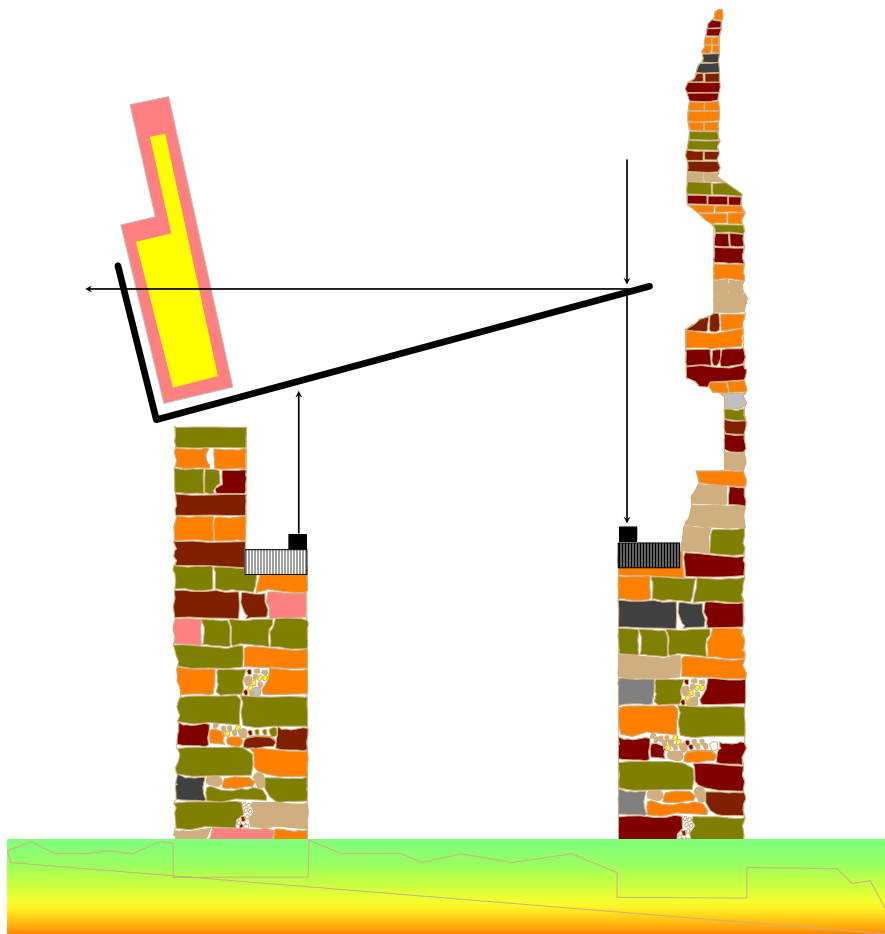
- Verfüllen der im Mauerwerk verteilten Hohlräume; Probebohrungen ließen auf ein Hohlraumvolumen bis zu 15 % schließen

Nach der Untersuchung der historischen Bausubstanz des Barbarossaturmes durch das FIB [52] wurde für die Hohlraumverfüllung Schaummörtel auf der Basis eines hochsulfatwiderstandsfähigen PZ (CEM 42,5 R-HS) empfohlen. Die Schaumdosierung erfolgte gemäß des empfohlenen Frischrohddichtegebietes nach der Förderpumpe von 1,05 bis 1,15 kg/dm³, was einem volumetrischen Verhältnis von Bindemittelteil zu Schaum von 2 : 1 entspricht. Maßgebend für die Druckfestigkeit und den dynamischen E-Modul des ISM ist die Festmörtelrohddichte bei bauwerksrelevantem Klima (im

Jahresmittel 10 °C und 85 % r.F.), die mit der Frischmörtelrohddichte korreliert [34]. Bei o.g. Rohdichten ergaben sich Druckfestigkeiten zwischen 5 und 10 N/mm².

Durch den Einsatz des Schaummörtels gelang es in Verbindung mit dem Einbohren von Nadeln und Ankerlagen, den für das Einkippen (Bild 138) notwendigen Verband der Mauerwerksbaustoffe wiederherzustellen. Das Abtrennen des betreffenden Mauerwerksabschnittes vor dem Kippvorgang erfolgte durch beabsichtigtes Abreißen im Fugenbereich. Zum Abstützen der Last des abgetrennten Mauerwerkskörpers (bis 280 t) diente der auf den Auflagern der ehemaligen Geschoßdecken angeordnete Stahlbeton-Ringbalken (Bild 138, senkrecht schraffierter Bereich).

Bild 138: Vereinfachte schematische Darstellung des Kippvorganges



Neben dem Verfüllen der Hohlräume und dem Wiederherstellen des Mauerwerksverbundes trägt der Schaummörtel auch zur Reduzierung des Feuchtetransportes im Mauerwerk bei. Darüber hinaus konnte durch den zusätzlichen Porenraum das Restrisiko einer schädlichen Ettringitbildung (durch den Kontakt des feuchten Gipsmörtels mit dem C₃A-armen Portlandzement) minimiert werden. Insgesamt wurden fast 100 m³ mit Schaummörtel verfüllt. Bei einer Rohddichte von 1,1 kg/dm³ bedeutet das einen Materialeintrag von nur 110 Tonnen in das gesamte Bauwerk

gegenüber mind. 170 t bei Einsatz herkömmlicher mineralischer Injektionsmörtel (Rohdichten ca. 1,7 bis 1,9 kg/dm³).

Nach erfolgreichem Abschluß der Sanierungsarbeiten 1997 kann festgestellt werden, daß durch die Innovationsfreudigkeit und das technische Know-How der Fa. Bennert in Verbindung mit dem am FIB entwickelten ISM eine außergewöhnliche Sicherungsmaßnahme möglich wurde. Bild 139 zeigt den Zustand nach der Sanierung am Beispiel der Turmostseite.

Bild 139: Ostansicht des Barbarossaturmes nach der Sanierung



7.2.2 Kornmarktkirche in Mühlhausen

Die Kornmarktkirche im Zentrum Mühlhausens (Bild 140) wird seit einigen Jahrzehnten nicht mehr für religiöse Zwecke, sondern museal und kulturell genutzt. Im Rahmen der Sanierung und der Umbauten des Kircheninneren in den Jahren 1993 bis 1996 erfolgte auch eine Mauerwerkstrockenlegung. In Verbindung mit dieser Trockenlegung des Mauerwerkes durch Injektion von Jektipal kam auch der Injektionsschaummörtel zum Einsatz. Jektipal EM 12 ist ein Injektionsmittel auf der Wirkstoffbasis von Silicon und Silikat, hergestellt von der Fa. DAGRA Bauchemische Produkte.

Das Mauerwerk des Objektes aus Travertin und Gips-Kalkmörtel ist zweischalig mit einem ca. 35 cm breiten Spalt zwischen Innen- und Außenschale. Bei der endoskopischen Untersuchung des Mauerwerkes ergab sich jedoch, daß der

Zwischenraum teilweise mit Mörtel und Steinmaterial ausgefüllt ist. Um den Verbrauch an Injektionsmittel in Grenzen zu halten, war eine vorherige Verfüllung des Zwischenraumes und ggf. anderer Hohlräume mit ISM vorgesehen. Da beim Bohren der Löcher für die Jektipalinjektion Hohlräume im Travertin (Kavernen) angeschnitten werden können, wurde vorgeschlagen, die Löcher zunächst mit ISM auszufüllen und erst nach erneutem Aufbohren das Jektipal zu injizieren [32].

Zuvor mußte jedoch getestet werden, ob die Trängung des ISM mit Jektipal grundsätzlich möglich ist und ob eine hydrophobierende Wirkung mit Jektipal erzielt werden kann.

ISM- Rezeptur:

Bindemittel: hochsulfatwiderstandsfähiger PZ (CEM 42,5 R-HS) wegen der gipshaltigen Mörtel und der nachgewiesenen Chlorid- und Nitratbelastung

Schaumbildner: SB 2 ADDIMENT

Stabilisierer: ST 2 ADDIMENT

Schaumdosierung: volumetrisches Verhältnis

 Bindemittelleim (=Zement+Wasser): Schaummörtel nach Vorversuchen im Labor festgelegt

Bild 140: Kornmarktkirche, heute als Bauernkriegsmuseum genutzt



Die Vorversuche erfolgten am FIB unter Leitung von Herrn Mielke [32]. Dabei zeigte sich, daß eine ausreichende Verteilung des Jektipals in einer vertretbaren Zeit nur bei

ausgleichsfeuchten Rohdichten des ISM $< 0,8 \text{ kg/dm}^3$ gegeben war. Am günstigsten erwiesen sich Rohdichten um $0,5 \text{ kg/dm}^3$. D.h. bei diesem konkreten Anwendungsfall waren nicht die Druckfestigkeiten des ISM (korrelierend mit den E-Moduln) die bestimmenden Größen, sondern die Rohdichten.

Bei der Applikation lagen die Frischmörtelrohndichten nach der Pumpe zwischen $0,4$ und $0,78 \text{ kg/dm}^3$ (entspricht den ausgleichsfeuchten Rohdichten im Mauerwerk bei 10°C und ca. 86 % r.F., siehe S. 106f.). An vor Ort hergestellten Probewürfeln wurden ausgleichsfeuchte Festmörtelrohndichten von $0,42$ bis $0,78 \text{ kg/dm}^3$ ermittelt. Die Mehrzahl der Rohdichten lag zwischen $0,58$ und $0,64 \text{ kg/dm}^3$.

Zur Kontrolle der hydrophobierenden Wirkung des Jektipals auf den Travertin sowie auf den penetrierten ISM wurde nach 11tägiger Erhärtung des ISM im Mauerwerk ein Bohrkern entnommen ($\varnothing = 10 \text{ cm}$, Tiefe ca. 100 cm). Die hydrophobierende Wirkung wurde dabei durch Besprühen von Bohrkernabschnitten mit Wasser getestet: nach 2 Wochen, 1/2 Jahr und ca. 1 1/2 Jahren. Die Tests waren in jedem Fall positiv, so daß davon ausgegangen werden kann, daß das Sanierungsziel erreicht wurde.

7.2.3 Gotisches Haus in Anklam

In dem heutigen Baukörper des Gotischen Hauses sind zwei mittelalterliche Gebäude integriert, das Traufenhaus (1330/1330) und das Giebelhaus (um 1385) [63]. Weiterhin nachweisbar sind Um- und Ausbauten um 1660, im 18. Jh., um 1850, um 1870/80 und nach einem Brand im Jahr 1959.

Das Gebäude wurde aus großformatigen Ziegeln mit Kalk-Lehm-Mörteln errichtet. Die Untersuchung der historischen Mörtel und der Salzbelastung erfolgte durch Herrn Ullrich [59]. Die Herkunft der Ziegel sowie die stofflichen und keramtechnischen Kennwerte der unterschiedlichen Ziegelvaritäten wurden nicht untersucht. In [63] wird der Zustand der Ziegel verbal beschrieben, wobei als Verwitterungsbilder Substanzverlust (bis zu 7 cm!), Randzonenverlust, Bröckeln und Schalenbildung (Schelbern [80]) genannt werden.

Durch äußere Einwirkungen wie z.B. den Beschuß der Stadt durch den Großen Kurfürsten 1675, die erheblichen Windlasten aufgrund der Ecklage zum Kirchplatz, ursprüngliche Konstruktionsschwächen sowie fahrlässige bauliche Veränderungen (z.B. Durchtrennen des Ringbalkens und Veränderungen in den Pfeilerquerschnitten) kam es zu Verformungen des Bauwerkes, insbesondere zur Neigung des Giebels zur Außenseite von rund $0,8 \text{ m}$ im Jahr 1995 [63]. Diese Neigung bewirkte ein Einknicken der Pfeiler zwischen den vier großen Dielenfenstern, verbunden mit Rißbildungen und einem Abreißen der inneren Mauerschale vom Kern bis zu ca. 10 cm. Auch die äußere Schale zeigte partielle Ablösungen. Insgesamt bestand für den Giebel akute Einsturzgefahr.

Aufgrund der kulturhistorischen Bedeutung des Bauwerkes und dem Anteil an Originalsubstanz, die bis ins 14. Jh. zurückreicht, kam der Abtrag und Neuaufbau des Giebels nicht in Frage. Deshalb wurde beschlossen, die Giebelwand nach Sicherung durch eine temporäre Stützkonstruktion mauertechnisch instandzusetzen und

anschließend zu verankern und zu verpressen. Bild 141 zeigt den Zustand des Giebels vor der Sanierung.

Bei den intensiven Diskussionen zwischen Auftraggeber, Denkmalpflegern, Statikern und Sanierungsfirmen über die Art des zu verwendeten Injektionsmörtels und die Applikationstechnik setzte sich der ISM durch, nicht zuletzt wegen seiner vorteilhaften Eigenschaften insbesondere bei standsicherheitsgefährdeten Gebäuden wie niedrige Rohdichte, geringes Eigengewicht und niedriger Verpreßdruck.

Für den Injektionsmörtel zur Hohlraumverfüllung und den Verpreßmörtel für die Ankerkanäle wurden vom Statiker folgende Mindestanforderungen formuliert:

Hohlraumverfüllung: $\beta_D = 5 \text{ N/mm}^2$ $E_{\text{dyn}} = 3200 \text{ N/mm}^2$

Verpreßmörtel : $\beta_D = 6,5 \text{ N/mm}^2$ $E_{\text{dyn}} = 4600 \text{ N/mm}^2$

Da entgegen den Untersuchungsergebnissen von Herrn Ullrich [59] nicht zu vernachlässigende Gehalte an Sulfat (in der Form von Gips) als auch Chlorid (Natriumchlorid) und örtlich begrenzt Nitrat (wahrscheinlich in der Form von Calciumnitrat - „Mauersalpeter“) durch das FIB nachgewiesen wurden, wurde als Bindemittel für den ISM ein hochsulfatwiderstandsfähiger PZ empfohlen.

Für den Verpreßmörtel in den Ankerbereichen wurden Frischmörtelrohdsichten von $1,15 \dots 1,25 \text{ kg/dm}^3$ (entspricht einem BML:SM-Verhältnis von ca. 2:1) und für den ISM zur Hohlraumverfüllung von $0,9 \dots 1,1 \text{ kg/dm}^3$ empfohlen (entspricht einem BML:SM-Verhältnis von ca. 1:1). Die Hohlraumverfüllung und Ankerverpressung erfolgte im Oktober 1995 durch Mitarbeiter der Fa. SPESA Nordhausen. Insgesamt wurden ca. 1000 l Schaummörtel injiziert. Bild 142 zeigt den Zustand des Giebelhauses nach der Sanierung im September 1997.



Bild 141: Gotisches Giebelhaus vor ... Bild 142: ... und nach der Sanierung

Die Beschreibung der Einsatzgrenzen des ISM ist schwierig, u.a. weil es speziell für Injektionsmörtel keine DIN oder andere allgemein anerkannte Richtlinien oder Regelwerke gibt (sie unterliegen allgemein DIN 18555 „Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln“ und ggf. DIN 18557 „Werkmörtel; Herstellung, Überwachung und Lieferung“). Ausnahmen stellen hierbei das WTA-Merkblatt 4-4-94 „Mauerwerksinjektion gegen kapillaraufsteigende Feuchtigkeit“ [A21], das WTA-Merkblatt 4-3-94 (Entwurf) [A35] „Instandsetzung von Mauerwerk - Standsicherheit/Tragfähigkeit“ und die ZTV-RISS 93 zum Verfüllen von Rissen in Betonbauwerken [A23] dar, die wenigstens für einzelne Injektionsaufgaben Hinweise liefern.

Somit werden die Einsatzgrenzen für die verschiedenen Injektionsziele primär von den Eigenschaften, insbesondere den Festmörteleigenschaften, des ISM bestimmt.

Beispielsweise schränkt die hohe Schwindneigung den Einsatz an der Mauerwerksoberfläche bzw. im oberflächennahen Bereich ein, d.h. Rißsanierungen mit Schaummörtel sind nur möglich, wenn der Bereich überputzt wird und der betreffende Mauerwerksabschnitt nicht vollständig austrocknet.

Bei projektierten Festigkeiten $> 18 \text{ N/mm}^2$, z.B. beim Verpressen von Gebirgsankern, ist Schaummörtel nicht zu empfehlen, da aufgrund des geringen Schaumanteiles zum Erreichen dieser Festigkeiten der Aufwand für die Schaumerzeugung und den veränderten technologischen Ablauf gegenüber herkömmlichen Injektionen nicht gerechtfertigt wäre.

Im Einzelfall ist eine Eignungsprüfung zu empfehlen, insbesondere wenn der ISM mit organischen Sanierbaustoffen oder Bauchemikalien, z.B. Holzschutzmitteln kontaktiert.

8 Verallgemeinerung der Vorgehensweise bei Mauerwerksinjektionen mit ISM

Die Frisch- und Festmörteleigenschaften des ISM werden beeinflusst durch:

- die Art des hydraulischen Bindemittels
- das W/B-Verhältnis
- den Schaumanteil im Mörtel
- die Art des Schaumbildners und ggf. zugesetzte Feinzuschläge [81].

Die Auswahl des Bindemittels und der Rezeptur für den ISM ist vorzunehmen nach:

- dem Zustand des Bauwerkes/Bauteiles (Mauerwerksaufbau, Hohlraumanteil)
- dem Zustand der Mauerwerksbaustoffe (Mauersteine, Mörtel, Salzbelastung) nach vorheriger Untersuchung und Bewertung
- der Prüfung und Bewertung der stofflichen Verträglichkeit des ISM mit der Originalsubstanz
- den Forderungen hinsichtlich der mechanischen/statischen und bauphysikalischen Eigenschaften
- den objektspezifischen Bedingungen wie Förderweiten und -höhen
- der zur Verfügung stehenden Gerätetechnik

Gerätetechnische Einflüsse ergeben sich durch:

- den Mischer für den Bindemittelleim
- den Kompressor zur Drucklufterzeugung für die Schaumbildung
- die Druckeinstellung am Schaumgerät
- die Mischeinrichtung zum Untermischen des Schaumes
- die Funktionsweise der Pumpe
- die Druckregelung an der Pumpe und
- die Druckregelung am Packer

In Auswertung der vielfältigen praktischen ISM-Einsätze kann die Vorgehensweise bei der Schaummörtelinjektion wie folgt verallgemeinert werden:

1. möglichst umfassende Untersuchung des zu sanierenden Bauwerksabschnittes
2. Verträglichkeitsuntersuchungen
3. Auswahl des Bindemittels, Festlegung der Rezeptur (u.a. nach statischen Vorgaben)
4. Abtragen von losen Bestandteilen, z.B. Fugenausräumen
5. Ersetzen des Fugenmörtels und/oder ausgebrochener oder stark verwitterter Steinpartien (maurertechnische Instandsetzung)
6. Anbringen der Injektionspacker
7. Kontrolle der Frischrohddichte auf der Baustelle
8. Injektion mit Schaummörtel, Kontrolle des Injektionsdruckes
9. Güteüberwachung auf der Baustelle (Prüfkörper herstellen zur Prüfung der Druckfestigkeit, des E-Modul und der Rohddichte)
10. Injektionskontrolle (zerstörungsarm mittels Endoskopie oder durch Bohrkernentnahme)

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein luftporenreiches Injektionsmörtelsystem entwickelt, das in Verbindung mit geeigneter Applikationstechnik (Verfahren, Geräteanordnung) einen Beitrag zur schonenden, denkmalverträglichen Instandsetzung mehrschaliger Mauerwerke leistet. Hauptanwendungsgebiete sind die:

- Erhöhung der Mauerwerksstabilität (Hohlraumverfüllung, Spaltinjektion)
- Verbesserung der Tragfähigkeit, z.B. von Fundamenten
- Mauerwerksvergütung in Verbindung mit Vernadelungs- oder Verankerungsarbeiten
- Hohlraumausfüllung vor Mauerwerksinjektionen zur Reduzierung der aufsteigenden Feuchtigkeit
- partielle Befestigung loser Mörtel, z.B. Befestigung lockerer Putze

Das Injektionsmörtel**system**, allgemein als Injektionsschaummörtel bezeichnet, ergibt sich aus der Variation der hydraulischen Bindemittel, des Schaumanteiles, der Art des Schaumbildners und des Wasser-Bindemittel-Verhältnisses der Suspension vor der Schaumzugabe.

Der Bedarf für die Entwicklung eines neuen Injektionsmörtels ergab sich aus einer Reihe von Nachteilen der herkömmlichen Zementleime und Zementsuspensionen. Um eine ausreichende Fließfähigkeit zu erreichen, wird bei letztgenannten mit hohen Wasser-Bindemittel-Werten gearbeitet ($W/B=0,8...2,0$), was sich bezüglich der Entmischungsneigung, der Bildung von Kalkfahnen an der Mauerwerksoberfläche (da das Überschußwasser Calciumhydroxid enthält) sowie der Feuchte- und Massebelastung des Bauwerks ungünstig auswirkt. Darüber hinaus werden für die Zementleiminjektion i.d.R. hohe Drücke angewendet, die den Einsatz bei standsicherheitsbeeinträchtigten Bauteilen einschränken oder unmöglich werden lassen. Da sich zur Hinterfüllung nur hydraulisch erhärtende Bindemittel, i.d.R. Zemente, eignen, sind die erreichten Festigkeiten und Elastizitätsmoduln oft überdimensioniert und nicht dem jeweiligen Anwendungszweck angepaßt, so daß der erhärtete Injektionsmörtel als wenig elastische Plombe im elastischeren Mauerwerk wirkt.

Die gezielte Anwendung des ISM setzt eine genaue Kenntnis des Mauerwerksaufbaus, der verwendeten Baustoffe, der Salzbelastung und der klimatischen Verhältnisse des zu sanierenden Mauerwerkes voraus. Im Literaturteil wird deshalb auf historische Mauerwerksarten, -verbände, -gefüge und Schadensbilder eingegangen. Darüber hinaus werden die Wirkungsmechanismen der Mauerwerksinjektion und die geschichtliche Entwicklung der mineralischen Injektionsmörtel beschrieben unter Einbeziehung eigener Untersuchungen an historischen Injektionsmörteln.

Die vorliegende Arbeit beschreibt umfassend die Zusammensetzung, das Gefüge sowie die technologischen, hygrischen und Verbundeigenschaften von ISM, die anhand von Labor- und kleintechnischen Versuchen bis hin zu praktischen Anwendungen an verschiedenen Objekten mit optimierten Rezepturen ermittelt wurden (Tabelle 62).

Tabelle 62: Wichtigste Eigenschaften der Injektionsschaummörtel im Überblick

Kennwerte	Einheit	W/B = konst. zunehmender Schaumanteil	SM = konst. W/B zunehmend	Bereich der SM aller untersuchten BM ¹⁾
Frischmörteleigenschaften				W/B = 0,48 ... 0,55
ρ_f	kg/m ³	↓	↓	0,7 ... 1,45
LP-Gehalt	Vol%	↑	↑↓	20 ... 70
a	cm	↓	↑	17 ... 20
WRV	%	↑	↓	86 ... 94
Erstarrungszeit	h	↑	k.A.	primär vom BM abhängig
g-Wert (Fließgrenze)	N mm	↑	k.A.	primär vom BM abhängig
h-Wert (Viskosität)	N mm min	↓	k.A.	abhängig
Sedimentations- neigung		↓	↑	keine Wasser- absonderung bei SM
Festmörteleigenschaften²⁾				
ρ_{fest} ausgleichsfeucht 10/85 trocken 40°C	kg/dm ³	↓	↓	0,85 ... 1,45 0,6 ... 1,15
β_D	N/mm ²	↓	↓	2 ... 18
β_{BZ}	N/mm ²	↓	↓	1,4 ... 2,5
β_Z	N/mm ²	↓	↓	0,4 ... 0,8
β_{HZ}	N/mm ²	↑↓	k.A.	0,1 ... 0,7
β_{HS}	N/mm ²	↓	k.A.	0,2 ... 0,35
E-Modul	N/mm ²	↓	↓	3000 ... 10000
GP	%	↑	↑	50 .. 70
WA	%	↑	↑	30 ... 50
kap. WA	kg/m ² h ^{1/2}	↓	↑	1,5 ... 4,0
FTW	g/m ²	↑	k.A.	primär vom BM abhängig
Schwinden (20/65)	mm/m	↑	k.A.	-1,5 ... - 2,5
Quellen (WL)	mm/m	↑↓	k.A.	0,1 ... 0,5
Carbonatisierungs- tiefe	mm	↑	k.A.	primär vom BM abhängig
μ -Wert	-	↓	k.A.	8 ... 14

1) ... innerhalb der für Injektionsmörtel praktisch sinnvollen Grenzen, BML:SM= ca. 2:1 ... 1:2

2) ... überwiegend nach 28 d geprüft

↑↓ ... kein signifikanter Einfluß

k.A. ... keine Angaben, weil nicht untersucht

↑ ... Zunahme ↑ ... starke Zunahme

↓ ... Abnahme ↓ ... starke Abnahme

In die Untersuchungen wurden 5 hydraulische Bindemittel einbezogen: 3 handelsübliche Zemente nach DIN 1164-1, Teil 1: ein C₃A-armer, hochsulfatwiderstandsfähiger Portlandzement CEM I 42,5 R-HS, ein C₃A-reicher Portlandzement CEM I 42,5 R und ein hüttensandreicher, hochsulfatwiderstandsfähiger Hochofenzement CEM III/B 32,5 - NW/HS, ein speziell für gipshaltiges Mauerwerk entwickeltes Bindemittel aus Hüttensand, Anhydrit und Zement (HAZ) in Anlehnung an den früher genormten Sulfathüttenzement sowie ein natürlicher hydraulischer Kalk (Romankalk).

Ein wesentliches Kriterium zur Bewertung von Injektionsmörteln ist - neben den Eigenschaften des Materiales selbst - das Verbundverhalten zu den Mauersteinen aus Naturstein und/oder Ziegeln. In die Verbunduntersuchungen wurden vier verschiedene, bei historischen Sakral- und Profanbauten in Thüringen häufig verwendete Natursteine einbezogen (Sandstein, Gipsstein, Travertin und dichter Kalkstein) sowie zwei Ziegelvaritäten mit unterschiedlichen keramtechnischen Eigenschaften. Die Haftzugfestigkeiten aller Verbundvariationen mit den Natursteinen ohne und mit Schaum sind mit Werten zwischen 0,3 und 1,3 N/mm² als gut zu bewerten, wobei kein Bruchbild generell dominierte. Anhand der lichtmikroskopischen Untersuchungen ist ein nahtloser Verbund zwischen Injektionsschaummörtel und Gesteinen festzustellen. Die Erhöhung des Porenanteiles durch die Schaumzugabe wirkt sich zwar maßgeblich auf die Druckfestigkeit und den E-Modul aus, senkt aber in geringerem Maße die Festigkeiten bei Zugbeanspruchung; die Einflußnahme nimmt in der Reihenfolge Biegezugfestigkeit > Zugfestigkeit > Haftzugfestigkeit ab.

Während bei den Bindemittel-Naturstein-Kombinationen auf das Vornässen vor der Injektion verzichtet werden konnte, kam zwischen den trockenen Ziegeln und den verschiedenen Bindemittelleimen und Schaummörteln trotz Zugabe des Stabilisierers zur Erhöhung des Wasserrückhaltevermögens kein ausreichender Verbund zustande. D.h. bei Injektionen in trockenes Ziegelmauerwerk aus stark saugenden Ziegeln ist das Vornässen auch bei Verwendung von Injektionsschaummörtel unerlässlich. Bei Injektionen in historisches Ziegelmauerwerk mit i.d.R. hohen Feuchten und höheren Porenfüllungsgraden ist dies nicht der Fall.

Schwerpunkt bei der Schaummörtelentwicklung war neben der Anpassung der bauphysikalischen und Festmörtelkennwerte wie Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Wasserdampfdiffusionswiderstand usw. an die Anforderungen des zu sanierenden Mauerwerkes die chemische Verträglichkeit mit bauschädlichen Salzen, die in historischen Mauerwerken häufig in hoher Quantität und Komplexität auftreten.

Während die in der Praxis bekannteren Wirkungen der Salze wie Hygroskopizität und Gefügebeeinträchtigungen durch Kristallisation/Lösen und Hydratation/Dehydratation sowie lösenden und treibenden Angriff im Literaturteil näher beleuchtet werden, bildet die langfristige Untersuchung und die praxisrelevante Bewertung der chemischen Verträglichkeit ausgewählter, an historischen Bauwerken häufig auftretender Salze mit den hydraulischen Bindemitteln der Injektionsmörtel einen Schwerpunkt des analytischen Teils der Arbeit.

Zur Beurteilung der Verträglichkeit wurden der Verlauf der Längenänderung von Bindemittelprismen mit 10 % des jeweiligen Salzes (= innerer Angriff), die Längenänderung bis zu 4 Jahren als Differenz zur Nullprobe sowie die äußere Beschaffenheit der Prüfkörper herangezogen. Dieser simulierte Angriffsmechanismus

tritt in der Sanierungspraxis beispielsweise ein, wenn Salze auf Baustoffoberflächen z.B. Natursteinflächen beim Kontakt mit frischem Mörtel bei der Neuverfugung oder Mauerwerksinjektion gelöst und so in innigen Kontakt mit dem Mörtelbindemittel gebracht werden. Zur Bewertung der Verträglichkeit wurden Grenzwerte für die Längenänderungen als Differenz zur Nullprobe festgelegt. Bei Gefügeschäden, z.B. Rißbildung, ist in jedem Fall von Unverträglichkeit auszugehen.

Es wurden herkömmliche Zementleime für Injektionen und Injektionsschaummörtel mit einheitlichem Wasser-Bindemittel-Wert von 0,5 im Kontakt mit CaSO_4 , MgSO_4 , KNO_3 , NH_4NO_3 und NaCl untersucht.

CEM I 42,5 R

Dieser C_3A -reiche Portlandzement ist mit allen untersuchten Salzen unverträglich. Die größten Dehnungen treten in Gegenwart des MgSO_4 und CaSO_4 auf, die sowohl beim erhärteten Bindemittel als auch beim Schaummörtel zu Gefügeschäden bis hin zur völligen Zerstörung der Prüfkörper führen. Die Gefügeschäden treten in der Form von netzartigen Rissen, Abplatzungen der „Bindemittelhaut“ an der Oberfläche sowie an den Prismenecken und -kanten und in der Form von Verkrümmungen auf.

In Gegenwart von NH_4NO_3 , KNO_3 und NaCl traten beim Schaummörtel geringere Dehnungen auf als beim erhärteten Purzement.

CEM I 42,5 R-HS

Der C_3A -arme Zement ist salzverträglicher als der C_3A -reiche PZ, d.h. die Dehnungen in Gegenwart der untersuchten Salze sind deutlich niedriger. Unverträglichkeit tritt bei diesem Zement im Kontakt zum MgSO_4 und NH_4NO_3 auf. Bei innerem Angriff von CaSO_4 ist der C_3A -arme, speziell für äußeren Sulfatangriff (HS = hochsulfatwiderstandsfähig) konzipierte PZ nur bedingt einsetzbar, abhängig von der Exposition am Bauwerk (Fundament, Sockel, Mauerkrone etc.), den konkreten Klimabedingungen und der Verteilung und Quantität des Calciumsulfates.

Mit Kaliumnitrat und Natriumchlorid ist CEM I 42,5 R-HS gut (KNO_3) bis bedingt verträglich (NaCl).

HAZ

Der HAZ als nachgestellter Sulfathüttenzement ist überwiegend gut bis bedingt salzverträglich. Im Fall einer hohen Magnesiumsulfatbelastung am Bauwerk stellt der HAZ von den untersuchten Bindemitteln (trotz Abbindeverzögerung) überhaupt die einzig praktikable Lösung dar, sofern im zu sanierenden Bauwerksabschnitt nicht bereits massiv Portlandzement in einer vorangegangenen Sanierungsmaßnahme verwendet worden ist.

CEM III/B 32,5-NW/HS

Der hüttenandreiche Zement CEM III/B 32,5-NW/HS ist von den untersuchten Salzen nur mit Kaliumnitrat verträglich. Große Dehnungen verbunden mit Gefügeschäden treten - analog zum C_3A -reichen PZ - beim inneren Angriff durch MgSO_4 und CaSO_4 auf. Im Kontakt zum CaSO_4 wurden bei den Schaummörteln höhere Dehnungen

gemessen als beim erhärteten Purzement. In Gegenwart des NH_4NO_3 treten zwar keine großen Längenänderungen, dafür aber Risse auf.

Romankalk

Trotz geringer Längenänderungen ist der Romankalk als NH_4NO_3 -unverträglich zu bewerten, da nach 180 Tagen Risse auf der gesamten Prüfkörperoberfläche festgestellt wurden. Auch in Gegenwart des MgSO_4 zeigten sich Gefügestörungen in der Form von Rissen und Abplatzungen, korrelierend mit großen Dehnungen. KNO_3 und NaCl sind als bedingt verträglich mit dem Romankalk zu bewerten.

Am Beispiel der häufig auftretenden Gipsbelastung wurde bei unterschiedlichen Bindemitteln bzw. deren Bindemittelkomponenten (z.B. Hüttsand und Traßmehl) versucht, die Verträglichkeit oder Unverträglichkeit auf Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Porenlösung, der mineralogischen Zusammensetzung und der Quantität der Hydratationsprodukte zurückzuführen. Im Fall des HAZ kann die gute Gipsverträglichkeit sowohl bei innerem als auch äußerem Angriff u.a. damit begründet werden, daß die Porenlösung der unbelasteten Probe bereits mit Gips übersättigt ist und die Gipszugabe zu keiner zusätzlichen Ettringitbildung führt.

Bei den untersuchten Traßkalken kam es durch die Gipszugabe zu Treiberscheinungen und Gefügeschäden verbunden mit einer Abnahme des löslichen Al_2O_3 -Gehaltes und Zunahme des Ettringitgehaltes.

Anhand baubegleitender Untersuchungen bei der Überwachung der Frischmörteleigenschaften während der Injektion (ausgeführt durch autorisierte Firmen), der Laboruntersuchung von Prüfkörpern, die vor Ort hergestellt worden waren sowie durch Kontrollen nach unterschiedlichen Erhärungszeiten des Injektionsschaummörtels im Mauerwerk mittels Endoskopie und Bohrkernentnahme konnte nachgewiesen werden, daß die jeweiligen Sanierungsziele in Verbindung mit dem ISM erreicht werden konnten.

Aufbauend auf den Erfahrungen der Laborversuche sowie der Betreuung und Überwachung an mehr als 30 Objekten in 6 Bundesländern in Zusammenarbeit mit Architekten, Statikern, Denkmalpflegern und Ausführenden kann der Ablauf der Schaummörtelinjektion in der folgenden Weise verallgemeinert werden:

1. möglichst umfassende Untersuchung des zu sanierenden Bauwerksabschnittes
2. Verträglichkeitsuntersuchungen
3. Auswahl des Bindemittels, Festlegung der Rezeptur (u.a. nach Vorgaben des Statikers)
4. Abtragen von losen Bestandteilen, z.B. Fugenausräumen
5. Ersetzen des Fugenmörtels und/oder ausgebrochener oder stark verwitterter Steinpartien (maurertechnische Instandsetzung)

6. Anbringen der Injektionspacker
7. Kontrolle der Frischrohddichte auf der Baustelle
8. Injektion mit Schaummörtel, Kontrolle des Injektionsdruckes
9. Güteüberwachung auf der Baustelle (Prüfkörper herstellen zur Prüfung der Druckfestigkeit, des E-Modul und der Rohddichte)
10. Injektionskontrolle (zerstörungsarm mittels Endoskopie oder durch Bohrkernentnahme)

Folgende baugeschichtlich und kulturhistorisch wertvollen Baudenkmäler wurden zwischen 1992 und 1997 unter Anwendung von ISM u.a. saniert:

- Schönburg an der Saale
- Runneburg in Weißensee
- Barbarossa-Turm auf dem Kyffhäuser
- Rathaus und Stadtmauer in Mühlhausen
- Wehrtürmchen an der Stadtmauer in Sömmerda
- Divi Blasii-Kirche in Mühlhausen
- Johanniskirche in Ellrich
- Gotisches Giebelhaus in Anklam
- Klosterruine in Gramzow

10 Literaturverzeichnis

- [1] Biczók, I.: Betonkorrosion Betonschutz, Gemeinschaftsaufgabe Berlin, Budapest 1960
- [2] Blum, H.: Die Trockenlegung nasser Tunnelgewölbe und Widerlager. In: Centralblatt der Bauverwaltung. (1890) 10
- [3] Bowen, R.: Grouting in engineering practice. Applied science publishers LTD, London 1975
- [4] Böttger, C.: Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze. Dissertation Weimar 1996
- [5] Brameshuber, W., Krams, J., Schmidt, D.: Injektionen mit Zementsuspension und Zementleim nach ZTV-RISS 93. In: 12. ibausil 1994 in Weimar, Band 2, Beitrag Nr. 1.28, S. 129-138
- [6] Cammerer, J.S., Krischer, O., Kristen, T., 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
- [7] Dahmann, W.: Untersuchungen zum Verbessern von mehrschaligem Mauerwerk durch Vernadeln und Injizieren, Dissertation Karlsruhe 1983
- [8] Faller, A., Karotke, E., Althaus, E.: Zur Dauerhaftigkeit von Mauerwerks-sanierungen. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, SFB 315, Jahrbuch 1988, Verlag Ernst&Sohn, Berlin 1989, S. 131-142
- [9] Fichtner, W.: Methoden der behutsamen Mauerwerksinstandsetzung. In: 12. ibausil 1994 in Weimar, Band 2, Beitrag Nr. 1.14, S. 67-72
- [10] Franke, L., Bentrup, H.: Paraffininjektionsverfahren zur Trockenlegung von Mauerwerk - Beurteilung der Wirksamkeit. In: Bautenschutz + Bausanierung 16 (1993), S. 5-8
- [11] Franke, L., Bentrup, H., Fricke, R.: Tragfähigkeitserhöhung von Mauerwerk durch Injektionen. In: Bautenschutz + Bausanierung 15 (1992), S. 21-25
- [12] Freyburg, S.: Historisches Ziegelmaterial - Charakteristik, Schadensbilder und Schadensursachen, In: WTA-Schriftenreihe, Heft 6 (1995), S. 74-93
- [13] Freyburg, S.: Ziegelparameter historischer und moderner Ziegel - vergleichende 218

Gegenüberstellung, 1997, Veröffentlichung in Vorbereitung

- [14] Garrecht, H., Kropp, J., Hilsdorf, H.K.: Das Mikroklima - ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung von Feuchteschäden und Sanierungskonzepten historischer Bauwerke. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, SFB 315, Jahrbuch 1990, Verlag Ernst&Sohn, Berlin 1991, S. 41-61
- [15] Gathemann, B., Erfurt, W.: Injektionsschaummörtel - Anwendungstechnik. 12. ibausil Weimar 1994, Beitrag-Nr. P 10, Tagungsbericht Band 3, S. 82-94
- [16] Graf, O.: Gasbeton, Schaumbeton, Leichtkalkbeton. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1949
- [17] Hart, F.: Kleines Glossar zur Geschichte der Herstellung und Verwendung von Backsteinen. In: Archplus 84 (1968), S.66 - 69
- [18] Henkel, S., Knöfel, D.: Zur Verträglichkeit von mineralischen Mörteln mit sulfatbelastetem Mauerwerk. In: 12. ibausil 1994 in Weimar, Band 2, Beitrag Nr. 1.12, S. 58-66
- [19] Hoffmann, D. : Korrosive Wirkung von Nitratlösungen auf Portlandzement-Mörtel. In: Silikattechnik 42 (1991) 7, S. 234-237
- [20] Hübner, M., Thiele, R.: Schadensbetrachtungen am Turm der Johanniskirche in Ellrich/Harz. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Leipzig, Jahrgang 16 (1992) 1/2, S. 145-157
- [21] Karl, S.: Leichtzuschlag-Schaumbeton als Konstruktionsleichtbeton mit abgeminderter Rohdichte. Dissertation TH Darmstadt 1979
- [22] Knöfel, D., Trautmann, I.: Entwicklung eines Hüttensand-Gips-Portlandzement-Mörtels zur Injektion in mehrschaliges Mauerwerk, Teil 1: Optimierung des Bindemittels. In: ZKG 46 (1993) 2, S. 95-101
- [23] Knöfel, D., Schubert: Handbuch: Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege. Verlag Ernst&Sohn, Berlin 1993
- [24] Kollmann,H.: Sanierputzsysteme - Einleitung. In: Sanierputzsysteme. WTA-Schriftenreihe Heft 7, Aedificatio Verlag GmbH Freiburg, 1995, S.1-6
- [25] Kuhl, O.; Strübel, G.; Kollmann, H.: Einfluß von Wasser und Salzlösungen auf Sanierputze mit unterschiedlicher Porosität. In: Sanierputzsysteme. WTA-Schriftenreihe Heft 7, Aedificatio Verlag GmbH Freiburg, 1995, S. 13-34
- [26] Ludwig, U., Mehr, St., Moldau, D.: Ursachen von Schäden an historischen

Bauwerken und Vorschläge für eine Konzeption von Mörteln für Sanierungsarbeiten. In: Baumaschine und Bautechnik 31 (1984) 10, S. 396-404

- [27] Lütjohan: Zementeinspritzung unter Wasser zur Wiederherstellung des beschädigten Mauerwerks eines Brückenpfeilers im Kaiser-Wilhelm-Kanal. In: Zentralblatt der Bauverwaltung 23 Jg. (1907), S. 352-354
- [28] Lutz, P. et al.: Lehrbuch für Bauphysik. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart 1994
- [29] Manegold, E.: Schaum. Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft m.b.H., Heidelberg 1953, S. 349
- [30] Mann, W.: Druckfestigkeit von Mauerwerk. Eine statistische Auswertung von Versuchsergebnissen in geschlossener Darstellung mit Hilfe von Potenzfunktionen. In: Mauerwerkskalender 1983. Verlag Ernst & Sohn Berlin 1983, S. 687-699
- [31] Maus, H.: Über die Anfänge der Technik des Verpressens von Zement bei Mauerwerksbauten. In: SFB Jahrbuch 1987, S. 101 - 104
- [32] Mielke, I.: Kurzbericht zum Einsatz von ISM am Objekt Kornmarktkirche, Weimar 12.12.1995, unveröffentlicht
- [33] Mielke, I.: Kurzbericht zum Einsatz von ISM am Objekt Giebelhaus Anklam, Weimar 12.12.1995, unveröffentlicht
- [34] Mielke, I., Stark, J.: Praktische Erfahrungen beim Einsatz des Injektions-schaummörtels. In: Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes.-Weimar 41 (1995) 6/7, S. 139-145
- [35] Ohnemüller, W.: Reaktionen zwischen Steinoberfläche und Mörtel. Westdeutscher Verlag Köln, 1966
- [36] Pieper, K.: Sicherung historischer Bauten. Verlag Ernst & Sohn Berlin-München 1983, S. 88-94
- [37] Pieper, K., Hempel, R.: Schäden durch Sicherungsmaßnahmen an Bauten mit Gipsmörtel. In: SFB Jahrbuch 1987, S. 73-88
- [38] Pier, J.: Aufbau und Festigkeit zementgebundener Schaummörtel. In: ZKG 47 (1994) 12, S. 697-701
- [39] Pier, J.: Herstellung und Einsatz von Schaummörteln im Steinkohlebergbau. Dissertation am Fachbereich 10 - Maschinentechnik der Universität-Gesamthochschule Paderborn 1992

- [40] Reul, H.: Handbuch der Bauchemie. Einführung in die Grundlagen - Rohstoffe, Rezepturen. Verlag für chem. Industrie, H. Ziolkowsky KG, Augsburg 1991, S. 227 ff.
- [41] Romberg, H.: Zementsteinporen und Betoneigenschaften. In: Beton-Information, 18 (1978), S. 50-55
- [42] Roth, H.: Verwendbarkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls, insbesondere für die Frostbeständigkeitsprüfung des Betons. In: Zement und Beton 22 (1971) 1, S.32-35
- [43] Rüth, G.: Die Wiederherstellung und Sicherungsmaßnahmen am Dom in Nordhausen. In: Die Denkmalpflege. München 1931, Nr.2/3, S. 76-83
- [44] Sager, H., Graeve, H.: Einsatzmöglichkeiten zementgebundener Injektionssysteme. In: Beton 1 (1994), S. 12-16
- [45] Sattler, H.: HGZ-Fasermörtel für die Fugensanierung - Anwendungsvorteile und -grenzen. In: Bauwirtschaftliche Informationen, November 1993, S. 2-5
- [46] Schoch, K.: Die Mörtelbindestoffe Zement-Kalk-Gips, Verlag der Tonindustriezeitung, 4. Auflage, Berlin 1928, S. 345
- [47] Schwarz, H.W.: Schaumstabilität. Fette, Seifen, Anstrichmittel 66, Nr. 5 (1964), S. 380-383
- [48] Schwick, W., Diedrichs, U.: Untersuchungen an silicastaubmodifizierten Bindemitteln zur Sanierung gipshaltiger historischer Bauwerke. In: Technologie und Anwendung der Baustoffe, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften Berlin
- [49] Schulze, W.: Der Baustoff Beton. Band 1: Zementgebundene Massen. Verlag für Bauwesen Berlin, 9. Auflage Berlin 1984 und 1988, S. 307-308
- [50] Seidel, G.: Steine und Erden von Thüringen, Teil 1: Werksteine. In: baustoffindustrie (1991) 2, S. 53.-57
- [51] Siebel, E., Eickschen, E.: Bestimmung der Luftporenkennwerte am Frischbeton. In: Forschungsberichte des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 640 (1993)
- [52] Stark, J., Mielke, I., Stürmer, S.: Gutachten zur Untersuchung von Materialproben des Turmes der Kyffhäuser-Oberburg, Weimar 8.09.1994,

unveröffentlicht

- [53] Stark, J., Wicht, B.: Geschichte der Baustoffe - Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Baustoffkunde, Weimar 1995, S. 81
- [54] Stegemann, R.: Das große Baustofflexikon. Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart Berlin 1941, S. 797
- [55] Steiger, M., Dannecker, W.: Die Bedingungen für die Kristallisation verschiedener Salzhydrate am Beispiel Thenardit/Mirabilit. In: Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung, Band 6, Erscheinungstermin: April 1998
- [56] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springerverlag Berlin Heidelberg 1992, S. 240-241
- [57] Stürmer, S., Mielke, I.: Verträglichkeitsuntersuchungen, Teil 1: Verträglichkeitsuntersuchungen mit verschiedenen Bindemitteln und Altmaterial. In: Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes.-A/B-Weimar 39 (1993) 3, S. 99-105
- [58] Stürmer, S., Herbach, D.: Verträglichkeitsuntersuchungen, Teil 2: Verträglichkeitsuntersuchungen mit Natursteinen und Salzen. In: Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes.-Weimar 41 (1995) 6/7, S. 125-137
- [59] Ullrich, D.: Zwischenbericht Putze und Mörtel, Gotisches Giebelhaus Anklam (Nr. 94039), Berlin 26.06.1995, unveröffentlicht
- [60] Venzmer, H.: Sanierung feuchter und versalzener Wände. Verlag für Bauwesen GmbH Berlin, 1. Auflage, 1991, S. 28
- [61] Vierzigmann, G.A.: Zementgebundene Injektionssysteme. Vortragsmanuskript Nürnberg 04/96
- [62] Wagner, K.: Die Sicherung des Barbarossaturmes 1993 - 1997 - von den Problemen des Umganges mit einem stark verformten Denkmal. Gedanken bei der Übergabe des Bergfriedes an den Bauherrn am 22.05.1997
- [63] Wagner, P., Holst, J.C.: Gotisches Haus: Giebel zur Mägdestraße - Zwischenbericht 03/95, unveröffentlicht
- [64] Warnecke, P., Rostazy, F.S.: Untersuchung und Beurteilung des Mauerwerks der Nordfassade des Pfingstberg Belvedere, Potsdam. 1. Zwischenbericht, Juni 1992,
Bericht Nr. 8003/8404/1

- [65] Warnecke, P., Rostazy, F.S., Budelmann, H.: Tragverhalten und Konsolidierung von Wänden und Stützen aus Natursteinmauerwerk. In: Mauerwerkskalender 1995, S. 623-660
- [66] Weber, H.: Sanierungsspielraum - wider die Kompromißlosigkeit bei Umnutzung und Gestaltung. In: bausubstanz 7-8/94, S. 56-58
- [67] Weber, H.: Fassadenschutz und Bausanierung. Expert-Verlag, 4. völlig neubearb. und erw. Auflage, Ehningen 1988, S. 69
- [68] Weiß, G.: Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen Reihe B, Allgemeine und Angewandte Geologie 9, Verlag Friedrich Pfeil, München 1992
- [69] Werner, A.: Sanierung von Kirchenbauten an der Elbe. In: bausubstanz 2 (1986) 5, S.36-40
- [70] Wolfsholz, A.: Wiederherstellung schadhafter Bauwerke mittels Einpressens flüssigen Zements. In: Zentralblatt der Bauverwaltung 23 Jg. (1903), S. 517-518
- [71] Wolfsholz, A.: Wiederherstellung der gewölbten Eisenbahnbrücken über den Mittel- und Südkanal in Hamburg mittels Zementeinpressung. In: Zentralblatt der Bauverwaltung 30 Jg. (1910), S. 359-360
- [72] Zivica, V.: Über die korrosive Wirkung von Calciumnitrat-Lösungen auf erhärtete Zementpaste. In: ZKG (1971) 4, S. 175-179
- [73] Einiges vom Ziegelverband. In: TIZ 64 (1926) 50, S. 1129 - 1130
- [74] Marktübersicht Injektionsverfahren: Nachträgliche horizontale Abdichtung - Stand 14.08.95. In: Bautenschutz + Bausanierung 6 (1995), S. 19-29
- [75] Thurament. - Firmenschrift Zementfabrik Thuringia Unterwellenborn (Thür.), III/1938
- [76] Van Gemert, D., Ladang, C., Carpentier, L., Geltmeyer, B.: Consolidation of the Tower of St. Marys Basilica at Tongeren. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1 (1995) 5, S. 371-392

- [77] Wischers,G. Sprung,S.: Verbesserung des Sulfatwiderstandes von Beton durch Zusatz von Steinkohlenflugasche - Sachstandsbericht Mai 1989. In: Beton (1990) 1 u. 2, S. 17-20, 62-66
- [78] Möser, B.: Betrachtung der frühen Hydratation von Klinkerphasen im ESEM-FEG. In: 13. IBAUSIL Weimar 1997, Tagungsband 1, S. 1-0791 - 1-0811
- [79] Schwiete, H.E., Ludwig, U., Otto, P.: Untersuchungen an Sulfathüttenzementen. Forschungsbericht des Landes NRW Nr. 2227, Westdeutscher Verlag Opladen
- [80] Seebach, J.: Kartierung der Ziegelschäden des BMFT-Pilotobjektes „Kampischer Hof“ in Stralsund, Abschlußbericht, Emkendorf 20.07.1993
- [81] Dreyer, A.: Untersuchung von Injektionsschaummörteln mit unterschiedlichen Feinststoffen, Diplomarbeit an der HAB Weimar, Fak. Bauingenieurwesen, November 1994
- [82] Römpp: Chemielexikon, 9. Auflage, Band 3, Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1990

Normen, Merkblätter und Prüfvorschriften

- [A1] DIN 4164: Gas- und Schaumbeton: Herstellung, Verwendung und Prüfung - Richtlinien, Oktober 1951

- [A2] DIN 53902 (12.77): Teil 1: Prüfung von Tensiden und Textilhilfsmitteln, Bestimmung des Schäumvermögens, Lochscheiben-Schlagverfahren
Teil 2: Prüfung von Tensiden, Bestimmung des Schäumvermögens, Modifiziertes Ross-Miles-Verfahren

- [A3] DIN 52 450 (01.84): Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe; Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern

- [A4] DIN 1053 (11.74): Mauerwerk, Berechnung und Ausführung

- [A5] DIN 4210 (7.59): Sulfathüttenzement
TGL 4258 (02.68): Sulfathüttenzement

- [A6] DIN 18 557 (05.82): Werkmörtel; Herstellung, Überwachung und Lieferung
DIN 18557/A1 (06.96): Werkmörtel; Herstellung, Überwachung und Lieferung
Änderung A1

- [A7] DIN EN ISO 2431 05/96: Bestimmung der Auslaufzeit mit Auslaufbechern
Lacke und Anstrichstoffe

- [A8] DIN EN 196: Prüfverfahren für Zement (03.90)
Teil 1 (03.90): Bestimmung der Festigkeit
Teil 3 (03.90): Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit
Teil 6 (03.90): Bestimmung der Mahlfeinheit

- [A9] DIN 4093 (09/87): Einpressen in den Untergrund

- [A10] DIN 18309 (12/92): VOB - Einpreßarbeiten

- [A11] DIN 1164: Zemente - Teil 1 (10.94): Zusammensetzung und Anforderungen

- [A12] DIN 52100: Teil 1 (07/39), Teil 2 (11/90) - Prüfung von Naturstein: Richtlinien zur Prüfung und Auswahl von Naturstein, Gesteinstechnische Untersuchungen

- [A13] DIN 1060 (03/95): Baukalk
Teil 1(03/95): Definitionen, Anforderungen, Überwachung
Teil 3 (01/86):Physikalische Prüfverfahren

- [A14] DIN 18555: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln
 Teil 1 (09.82): Allgemeines, Probenahme, Prüfmörtel
 Teil 2 (09.82): Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz der Rohdichte und des Luftgehaltes
 Teil 3 (09.82): Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte
 Teil 4 (03.86): Festmörtel; Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch
 Teil 5 (03.86): Festmörtel; Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln
 Teil 6 (11.87): Festmörtel; Bestimmung der Haftzugfestigkeit
 Teil 7 (11.87): Frischmörtel; Bestimmung des WRV nach dem Filterplattenverfahren

- [A15] DIN 52111(03.90):Prüfung von Gesteinskörnungen, Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat

- [A16] DIN 1048: Prüfverfahren für Beton
 Teil 5 (06.91):Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper

- [A17] DIN 50 008 (02.81): Konstantklimäte über wäßrigen Lösungen
 Teil 1: Gesättigte Salzlösungen - Glycerinlösungen

- [A18] DIN 52616 (11.77): Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommeßplattengerät

- [A19] DIN 1045 (07.88): Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung

- [A20] DIN 4030 (06.91): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase

- [A21] WTA-Merkblatt 4-4-96: Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit

- [A22] WTA-Merkblatt 2-2-91: Sanierputzsysteme

- [A23] ZTV-Riss 93: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Füllen von Rissen in Betonteilen. Verkehrsblatt - Dokument B 5237 - 06/93

- [A24] TP FG-EP Technische Prüfvorschriften für Füllgut aus Epoxidharz und zugehöriges Injektionsverfahren

- [A25] TP FG-PUR Technische Prüfvorschriften für Füllgut aus Polyurethan und zugehöriges Injektionsverfahren

- [A26] TP FG-ZL/ZS Technische Prüfvorschriften für Füllgut aus Zementleim/Zementsuspensionen und zugehöriges Injektionsverfahren

- [A27] Merkblatt für Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalken, Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Ausgabe 1979

- [A28] Merkblatt für die Bodenverfestigung mit Zement, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1984

- [A29] Vorläufiges Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau (Fassung 1969). In: beton 1 (1970), S. 19-23
- [A30] DIN 52 617 (05.87): Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen
- [A31] DIN 105 (08.89): Mauerziegel
- [A32] DIN 52102 (08.88): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen;
Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte,
Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität
- [A33] DIN 52103 (10.88): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen;
Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert
- [A34] DIN 52 615 (11.87): Wärmeschutztechnische Prüfungen;
Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen
- [A35] WTA-Merkblatt 4-3-94 (Entwurf): Instandsetzung von Mauerwerk -
Standsicherheit/Tragfähigkeit

Tabelle A1: Chemisch-mineralogische Zusammensetzung der verwendeten Natursteine

	GS	SS	MK	TR
GV (%)	19,60	5,80	43,76	43,46
CaO	32,90	0,90	50,70	54,20
SiO ₂	-	76,40	0,80	0,50
Al ₂ O ₃	0,50	10,10	0,90	0,80
Fe ₂ O ₃	-	5,50	1,48	0,04
MgO	-	1,10	2,20	-
SO ₃	46,70	0,20	0,16	1,00
Calcit CaCO ₃	+	-	++++	++++
Dolomit CaMg(CO ₃) ₂	-	-	+	-
Gips CaSO ₄ ·2H ₂ O	++++	-	-	-
Quarz	-	++++	+	+
Feldspat	-	+	-	-

Tabelle A2: Gesteintechnische Kennwerte der verwendeten Natursteine

	ρ _{Roh} (g/cm ³)		ρ _{Rein} (g/cm ³)		Gesamt- porosität (%)		Wasser- aufnahme- grad (%)		β _D (N/mm ²)		β _{BZ} (N/mm ²)
		Lit.		Lit.		Lit.		Lit.		Lit.	
GS	2,21	2,05- 2,28	2,68	2,28- 2,32	17,5	1,0- 8,0	0,3	0,4- 3,6	17,9	9- 40	1,2
SS	1,90	2,00- 2,65	2,74	2,64- 2,72	30,7	0,5- 25	11,5	0,2- 9	29,1	30- 180	1,0
MK	2,57	2,65- 2,85	2,81	2,70- 2,90	8,5	0,4- 2,0	0,8	0,2- 0,6	50-90	80- 180	5,4
TR	2,32	2,10- 2,50	2,70	2,66- 2,69	14,1	5,0- 12,0	12,2	2,0- 13,6	47	20,0- 74,0	1,9

TR ... Travertin
 MK ... Muschelkalk
 SS ... Sandstein
 GS ... Gipsstein

Tabelle A3: Kennwerte der verwendeten Ziegel

	Mz 8-1,6-NF	VMz 28-2,0-NF
Druckfestigkeit in N/mm ²	8,2	77
Biegezugfestigkeit in N/mm ²	1,5	7,2
Zugfestigkeit in N/mm ²		
Längsrichtung	0,18 ... 1,21	5,5 ... 6,34
Querrichtung	0,13 ... 1,14	1,14 ... 1,98
Scherbenrohddichte in kg/dm ³	1,59	1,81
Wasseraufnahme in %	25	17,7
offene Porosität in %	39,6	31,8
μ-Wert	6	11
kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient in kg/m ² h ^{1/2}	19,7	9,3

Tabelle A4: Längenänderung (mm/m) bei Feuchtlagerung für CEM I 42,5 R-HS (PZ 45 F - HS)

Alter	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	-0,010	0,030	0,110	0,390	-0,060	0,190	-0,110	-0,010	-0,003	0,350	0,210	0,025
14	-0,080	0,130	0,230	0,420	0,100	0,275	-0,110	0,090	0,080	0,800	0,250	0,079
21	-0,120	0,180	0,230	0,600	0,220	0,327	-0,110	0,130	0,160	0,580	0,350	0,108
28	-0,140	0,200	0,270	0,840	0,350	0,361	-0,150	0,180	0,180	0,360	0,420	0,117
56	-0,150	0,329	0,420	1,025	0,610	0,525	0,175	0,253	0,329	0,756	0,732	0,233
90	-0,125	0,344	0,578	1,052	0,904	0,588	-0,157	0,362	0,438	0,939	1,022	0,319
180	-0,050	0,456	0,772	1,152	1,410	0,765	-0,104	0,541	0,783	1,231	1,482	0,444
270	-0,212	0,520	0,946	1,192	1,335	0,786	-0,303	0,610	0,711	1,554	1,606	0,416
365	-0,209	0,562	0,934	1,206	1,258	0,892	-0,340	0,554	0,785	1,881	1,597	0,471
730	-0,191	0,623	1,219	1,589	2,073	1,073	-0,288	0,662	1,002	2,488	2,094	0,619
1095	-0,232	0,662	1,272	1,485	2,321	1,094	-0,012	0,775	1,162		2,468	0,752
1460	-0,016	0,712	1,325	1,833	2,379		-0,084	0,806	1,171		2,547	

Tabelle A5: Längenänderung (mm/m) bei Wasserlagerung für CEM I 42,5 R-HS (PZ 45 F - HS)

Alter	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,080	0,150	0,190	0,570	0,350	0,275	-0,010	0,020	0,060	0,460	0,230	0,112
14	0,150	0,270	0,320	0,810	0,580	0,408	0,020	0,090	0,150	0,640	0,490	0,206
21	0,170	0,320	0,360	0,980	0,780	0,494	0,030	0,170	0,220	0,760	0,650	0,210
28	0,270	0,330	0,430	1,150	0,970	0,546	0,050	0,200	0,340	0,820	0,830	0,234
56	0,280	0,460	0,590	1,421	1,404	0,734	0,050	0,284	0,498	1,158	1,225	0,308
90	0,350	0,581	0,990	1,679	1,818	0,888	0,077	0,434	0,677	1,156	1,571	0,381
180	0,340	0,740	1,109	1,962	1,400	1,186	0,202	0,781	0,819	1,321	2,210	0,537
270	0,340	0,778	1,122	2,108	2,714	1,233	0,136	0,766	0,990	1,344	2,471	0,531
365	0,281	0,775	1,182	2,231	2,869	1,371	0,148	0,837	1,073	1,409	2,683	0,596
730	0,325	0,882	1,525	2,437	3,475	1,529	0,146	1,024	1,250	1,425	3,092	0,783
1095	0,290	0,788	1,562	2,244	3,560	1,721	0,229	1,060	1,208	1,504	3,314	0,856
1460	0,347	0,756	1,756	2,594	3,981		0,183	1,166	1,275	1,459	3,294	

Tabelle A6: Längenänderung (mm/m) bei Feuchtlagerung für CEM I 42,5 R (PZ 45 F)

Alter	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	-0,040	0,010	0,310	1,350	0,360	0,356	-0,020	0,110	0,310	0,680	0,550	0,112
14	-0,150	0,080	0,530	1,550	0,690	0,536	-0,030	0,180	0,550	0,890	0,890	0,192
21	-0,130	0,090	0,690	1,470	0,970	0,662	-0,060	0,250	0,680	1,070	1,360	0,275
28	-0,150	0,110	0,840	1,880	1,410	0,708	-0,040	0,290	0,850	1,370	1,860	0,323
56	-0,130	0,280	1,470	2,500	2,452	1,050	-0,080	0,510	1,410	1,879	3,000	0,506
90	-0,104	0,406	2,262	2,635	3,744	1,262	-0,027	0,565	2,090	2,202	3,613	0,667
180	0,053	0,560	4,822	3,054	7,681	1,765	0,069	0,925	4,682	2,540	7,175	0,850
270	0,048	0,600	9,584	3,031	8,242	1,802	0,018	0,848	8,028	2,697	9,277	0,858
365	0,018	0,790	14,346	3,052	8,168	1,942	-0,112	0,819	9,337	3,059	9,644	0,948
730	0,106	0,959		3,492	28,337	2,036	0,019	1,196		3,458		1,210
1095	0,122	1,122		3,352		2,204	-0,032	3,762		3,587		1,997
1460	0,041	1,219		3,573			0,031			4,350		

Tabelle A7: Längenänderung (mm/m) bei Wasserlagerung für CEM I 42,5 R (PZ 45 F)

Alter	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,111	0,230	0,450	1,740	0,920	0,506	0,060	0,080	0,340	1,310	0,890	0,238
14	0,140	0,350	0,770	2,150	1,350	0,783	0,130	0,150	0,600	1,600	1,700	0,415
21	0,190	0,420	1,100	2,410	2,070	0,946	0,130	0,230	0,840	1,860	2,330	0,456
28	0,200	0,500	1,290	2,720	2,680	1,046	0,130	0,280	1,030	2,060	2,970	0,469
56	0,270	0,710	2,020	3,156	4,027	1,446	0,110	0,420	1,790	2,266	6,020	0,558
90	0,316	0,891	3,034	3,500	6,458	1,738	0,140	0,571	2,942	2,934		0,629
180	0,438	1,228	7,718	3,802	10,594	2,156	0,256	0,892		2,512		0,777
270	0,497	1,400	19,753	3,979	14,868	2,187	0,217	1,044		2,641		0,769
365	0,560	1,604		4,123	19,948	2,304	0,279	1,192		2,710		0,800
730	0,638	1,819		4,315		2,538	0,302	1,473		2,838		0,965
1095	0,703	2,013		4,081		2,742	0,394			2,587		0,994
1460	0,694	2,150		4,437						2,900		

Tabelle A8: Längenänderung (mm/m) bei Feuchtlagerung für CEM III/B 32,5- NW/HS (HOZ 35 L - NW/HS)

Alter	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,210	0,070	0,640	0,050	-0,280	0,012	0,210	-0,010	0,560	-0,030	-0,140	-0,236
14	0,200	-0,020	0,910	0,050	-0,470	0,122	0,210	-0,050	0,910	-0,060	-0,100	-0,421
21	-0,020	-0,110	1,020	0,160	-0,420	0,194	-0,010	0,020	1,080	-0,010	0,040	-0,144
28	0,010	-0,070	1,290	0,110	-0,553	0,259	-0,050	-0,030	1,220	-0,010	0,250	-0,113
56	-0,190	-0,060	1,860	0,150	-0,306	0,522	-0,034	0,154	1,771	-0,021	0,398	0,098
90	-0,198	0,063	2,706	0,350	0,460	0,703	0,054	0,241	2,296	0,000	1,431	0,196
180	0,090	0,360	4,811	0,608	0,746	0,990	0,006	0,373	2,681	0,044	2,521	0,459
270	0,038	0,391	4,800	0,452	1,612	1,069	-0,131	0,285	2,682	0,080	4,106	0,467
365	-0,169	0,460	4,804	0,590	2,300	1,184	-0,691	0,265	2,700	0,084	4,883	0,556
730	0,216	0,656	5,010	0,929	6,725	1,509	-0,347	0,521	2,790	0,146	11,532	0,834
1095	0,119	0,789	5,086	0,625		1,850	-0,790	0,563	2,688	-0,104		0,834
1460	0,163	0,858	5,119	1,150			-0,375	0,681	2,859	0,204		

Tabelle A9: Längenänderung (mm/m) bei Wasserlagerung für CEM III/B 32,5-NW/HS (HOZ 35 L - NW/HS)

Alter in d	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,320	0,080	0,870	0,040	1,140	0,667	-0,050	0,140	0,560	-0,020	0,130	0,221
14	0,390	0,050	1,260	0,060	1,370	0,782	0,070	0,270	0,930	0,080	0,360	0,377
21	0,440	0,050	1,580	0,120	1,480	0,873	0,120	0,350	1,130	0,110	0,720	0,413
28	0,500	0,080	1,760	0,170	1,660	0,981	0,130	0,340	1,260	0,150	1,160	0,456
56	0,450	0,190	2,620	0,206	2,085	1,263	0,232	0,489	1,981	0,302	3,283	0,562
90	0,521	0,333	4,071	0,285	2,719	1,531	0,260	0,558	2,860	0,342	6,210	0,659
180	0,771	0,514	7,554	0,342	4,429	2,169	0,350	0,679	3,865	0,575	13,040	0,654
270	0,725	0,595	7,585	0,373	6,169	2,252	0,397	0,752	3,956	0,602	17,634	0,625
365	0,771	0,683	7,652	0,423	7,782	2,465	0,331	0,737	3,969	0,654	21,244	0,569
730	0,871	0,883	7,746	0,529	11,891	2,867	0,440	0,823	4,031	0,746	28,478	0,321
1095	0,995	0,989	7,871	0,362	15,116	3,198	0,578	1,139	4,146	1,135	32,206	0,069
1460	0,985	1,279	7,875	0,660	17,238		0,484	0,862	4,106	0,852	29,662	

Tabelle A10: Masseänderung (%) bei Feuchtlagerung für CEM I 42,5 R-HS (PZ 45 F - HS)

Alter in d	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-0,76	-0,99	-0,67	-1,42	-1,79	1,24	-0,81	-0,59	-0,62	0,54	-1,26	0,36
14	-0,75	-0,43	-0,69	-0,86	-1,57	1,83	-0,79	0,51	-0,52	1,05	-3,11	0,62
21	-0,61	0,12	-0,79	-0,55	-1,45	2,03	-0,65	1,41	-0,51	1,12	-2,93	0,62
28	-0,54	0,81	-0,88	-0,15	-1,35	2,08	-0,67	2,33	-0,51	0,74	-3,03	0,89
56	-0,15	1,74	-0,77	0,66	-1,11	2,18	-0,33	4,36	-0,28	1,33	-2,42	1,99
90	-0,07	1,40	-0,51	0,78	-0,72	2,18	0,01	6,94	-0,02	2,49	-1,40	3,18
180	1,15	2,73	0,12	1,31	0,29	2,16	1,06	13,39	1,27	4,28	-0,24	6,12
270	1,25	3,27	0,59	1,68	-0,06	2,15	1,14	7,90	1,00	5,73	0,84	6,98
365	1,23	3,47	0,52	1,85	-0,20	2,25	1,34	9,22	1,25	5,94	1,58	10,92
730	2,48	3,55	1,36	3,69	2,07	2,36	2,45	11,52	2,53	8,59	2,97	14,36
1095	2,44	3,49	2,28	3,55	2,86	2,56		15,82	3,76		5,81	23,24
1460	2,76	3,68	3,05	3,68	3,39			13,48	4,73		6,64	

Tabelle A11: Masseänderung (%) bei Wasserlagerung für CEM I 42,5 R-HS (PZ 45 F - HS)

Alter in d	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-0,76	-0,01	2,54	2,10	2,04	0,36	4,90	5,73	4,35	7,70	2,40	17,34
14	3,26	0,01	2,88	2,62	2,27	0,81	5,80	6,19	5,31	8,25	2,66	20,36
21	3,51	0,32	2,90	2,94	2,55	0,86	6,49	6,61	6,00	9,37	2,86	21,63
28	3,76	0,36	3,02	3,27	2,80	0,83	6,89	7,01	6,68	11,73	3,37	22,70
56	3,94	0,66	3,23	3,48	2,88	0,84	7,97	7,54	8,02	18,85	4,67	24,93
90	4,08	0,79	3,54	3,69	3,12	0,85	9,04	8,23	8,35	21,98	4,81	28,04
180	4,30	1,00	3,76	3,86	3,39	0,53	10,33	10,18	3,79	25,06	5,29	35,32
270	4,48	1,08	3,90	3,98	3,62	0,42	11,08	11,11	5,20	28,32	5,55	35,78
365	4,60	1,12	4,02	3,92	3,68	0,25	11,38	10,94	5,35	29,35	5,66	36,86
730	4,66	1,11	4,23	3,79	3,94	0,26	12,47	10,38	6,09	32,25	6,43	38,16
1095	4,66	1,06	4,48	3,65	4,09	0,28	12,86	9,21	7,29	36,13	6,98	37,36
1460	4,66	1,10	4,69	3,49	4,18		13,12	11,64	8,58	38,79	7,54	

Tabelle A12: Masseänderung (%) bei Feuchtlagerung für CEM I 42,5 R (PZ 45 F)

Alter in d	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-0,40	0,13	0,91	-0,91	-0,93	1,57	-0,09	0,68	-0,01	-0,47	-0,54	0,28
14	-0,06	0,84	0,93	-0,62	-1,31	1,96	-0,01	1,06	-0,45	-0,14	-1,04	0,33
21	0,19	1,30	0,93	-0,83	-1,43	2,17	0,08	1,57	-0,63	0,28		0,66
28	0,39	1,55	0,91	-0,32	-1,22	2,30	0,19	2,11	-0,73	0,92	-0,74	1,14
56	1,17	2,58	1,08	1,05	-0,67	2,61	0,90	5,02	-0,42	2,81	0,01	2,44
90	1,65	2,84	1,34	1,15	-0,03	2,77	1,54	4,26	-0,23	4,20	0,06	3,52
180	3,35	3,30	2,31	3,35	2,03	2,92	4,93	5,84	1,00	7,04	2,52	7,58
270	3,66	3,51	3,48	2,83	1,34	2,91	4,70	6,33	2,02	7,48	3,21	8,85
365	3,67	3,82	4,42	3,01	0,96	3,14	4,48	5,70	2,50	7,45	3,00	12,55
730	4,10	3,96		5,34		3,36	7,25	11,81		9,63		18,09
1095	4,37	4,15		5,24		3,61	7,86	11,56		11,92		24,47
1460	4,34	4,28		5,32			9,76			14,94		

Tabelle A13: Masseänderung (%) bei Wasserlagerung für CEM I 42,5 R (PZ 45 F)

Alter in d	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,98	0,35	0,62	2,29	2,15	0,89	8,78	11,26	9,00	9,30	3,18	19,01
14	3,42	0,58	0,76	2,77	2,39	1,28	10,82	12,97	11,77	13,45	3,89	25,47
21	3,68	0,79	0,96	2,97	2,73	1,46	12,43	14,41	12,51	16,63	4,37	26,99
28	3,77	0,85	1,00	3,31	3,05	1,52	12,75	14,61	12,17	18,00	4,81	28,10
56	4,10	1,23	1,31	3,51	3,34	1,66	14,90	16,07	14,97	19,42	10,30	29,80
90	4,28	1,53	1,76	3,92	3,82	1,70	16,52	17,19	18,76	21,23		32,63
180	4,58	1,89	3,28	4,15	4,91	1,55	18,60	16,07		23,86		36,20
270	4,79	2,07	5,52	4,37	5,92	1,48	20,05	20,20		26,30		36,52
365	4,95	2,18		4,40	7,09	1,46	24,32	20,21		27,42		38,24
730	5,02	2,14		4,26		1,42	19,62	18,20		30,54		39,05
1095	4,98	2,00		4,18		1,40	18,76			32,17		39,31
1460	5,00	2,02		4,05			18,04			34,24		

Tabelle A14: Masseänderung (%) bei Feuchtlagerung für CEM III/B 32,5-NW/HS (HOZ 35 L-NW/HS)

Alter in d	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-0,68	-0,20	-0,47	-0,62	-0,28	0,99	-0,63	0,33	-0,30	0,32	-0,43	0,11
14	-0,84	0,57	-0,81	-0,20	-0,41	2,39	-1,25	0,88	-0,44	0,00	-0,12	0,05
21	-0,96	0,47	-1,35	1,10	-0,47	2,59	-1,46	1,25	-0,80	0,81	-0,18	0,47
28	-0,75	0,68	-1,40	2,43	-0,70	2,71	-1,44	0,83	-1,02	2,24	0,18	0,68
56	-0,54	1,19	-1,65	1,47	-0,29	3,08	-0,92	2,08	-0,80	6,01	0,31	1,40
90	-0,43	1,60	-1,67	4,35	0,16	3,29	-0,34	2,93	-0,86	10,68	1,54	1,91
180	0,60	3,00	-0,53	5,32	0,54	3,75	0,98	5,22	0,93	10,69	1,63	3,74
270	0,90	3,71	0,06	5,25	1,18	3,83	1,88	3,11	0,84	16,74	1,85	4,52
365	0,82	3,62	0,48	5,50	1,54	4,12		2,88	1,50	13,43	1,96	6,49
730	2,06	4,34	2,50	6,59	3,00	4,62	2,48	5,78	3,64	33,64	4,54	9,69
1095	2,38	4,48	3,24	6,87		5,01	5,24	7,72	4,60	39,58		14,29
1460	2,85	4,96	3,77	7,08			6,49	8,67	5,15	41,86		

Tabelle A15: Masseänderung (%) bei Wasserlagerung für CEM III/B 32,5-NW/HS (HOZ 35 L-NW/HS)

Alter in d	Bindemittel ohne SM						Schaummörtel					
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,50	0,99	2,42	0,18	1,32	1,54	16,22	3,66	6,09	6,05	1,58	20,04
14	2,92	1,27	2,74	0,43	1,64	1,96	21,79	5,17	6,75	8,29	2,06	21,31
21	3,07	1,40	2,92	0,94	1,79	2,14	25,00	5,87	7,36	9,77	2,24	21,55
28	3,16	1,48	3,05	1,51	2,07	2,27	25,64	6,32	7,33	10,05	2,49	21,44
56	3,46	1,68	3,40	1,75	2,19	2,68	28,50	7,87	8,44	11,16	3,45	23,77
90	3,66	1,98	4,13	2,01	2,53	2,96	30,60	9,18	8,53	11,36	3,51	28,51
180	4,09	2,58	5,60	2,31	3,31	3,49	34,60	11,90	9,60	11,95	6,85	38,94
270	4,43	3,09	5,78	2,62	3,92	3,55	36,96	13,89	10,52	12,85	8,69	42,28
365	4,59	3,46	5,87	2,67	4,27	3,78	38,34	15,16	11,54	13,17	9,88	48,54
730	4,98	4,59	6,04	3,13	5,39	4,32	42,87	19,69	15,36	14,53	12,67	61,11
1095	5,19	5,30	6,16	3,30	6,18	4,72	46,34	21,88	18,45	15,25	13,91	65,20
1460	5,39	5,39	6,43	3,45	6,73		48,57	22,86	20,99	15,54	14,80	

Tabelle A16: Masseänderung (%) bei Feuchtlagerung für HAZ

Alter in d	Bindemittel ohne SM				Schaummörtel			
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-0,42	-0,35	-0,33	1,01	-0,82	-0,84	-0,29	-0,59
14	-0,42	-0,36	-0,30	1,51	-1,39	-1,52	-0,47	-1,98
21	-0,42	-0,34	-0,28	1,63	-1,69	-1,89	-0,55	-1,30
28	-0,38	-0,30	-0,26	1,73	-2,13	-2,13	-0,65	-1,11
56	-0,26	-0,19	-0,18	1,88	-2,04	-2,41	-0,71	-0,40
90	-0,26	-0,14	-0,05	2,02	-2,92	-3,01	-0,97	-0,38
180	-1,96	-0,65	-0,85	2,34	-10,98	-9,66	-5,41	2,61
270	-5,02	-0,72	-2,18	2,42	-16,34	-10,22	-7,70	4,12
365	-2,95	-0,02	-1,45	2,61	-15,20	-7,59	-6,81	6,53
730	-0,57	3,26	0,86	3,07	-14,12	1,28	-2,78	9,77
1095	-0,30	3,45	1,23	3,48	-15,22	2,18	-0,72	11,48
1460	0,15	3,80	2,08		-15,78	3,96	-0,10	

Tabelle A17: Masseänderung (%) bei Wasserlagerung für HAZ

Alter in d	Bindemittel ohne SM				Schaummörtel			
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,32	1,28	1,89	1,34	15,27	13,02	5,45	17,25
14	2,41	1,41	1,93	1,59	19,13	14,06	6,24	18,87
21	2,41	1,45	1,96	1,74	21,19	14,87	6,83	19,14
28	2,40	1,46	1,95	1,77	22,60	15,89	7,28	19,03
56	2,45	1,56	1,98	1,99	25,58	19,58	8,12	21,12
90	2,47	1,60	1,99	2,15	27,06	21,86	8,56	24,97
180	2,63	1,87	2,17	2,47	32,00	27,81	9,28	31,59
270	2,75	2,07	2,26	2,50	35,33	30,69	10,65	32,95
365	2,95	2,28	2,47	2,69	37,33	33,13	11,44	34,55
730	3,43	2,99	2,99	3,28	43,99	39,85	13,81	36,19
1095	3,61	3,43	3,09	3,33	46,02	40,63	14,72	37,10
1460	3,86	3,89	3,42		47,97	41,16	15,65	

Tabelle A18: Längenänderung (mm/m) bei Feuchtlagerung für HAZ

Alter in d	Bindemittel ohne SM				Schaummörtel			
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,148	0,306	0,160	0,552	0,083	0,277	0,067	0,188
14	0,217	0,331	0,223	0,631	0,162	0,500	0,160	0,104
21	0,217	0,327	0,227	0,677	0,125	0,556	0,162	0,190
28	0,238	0,298	0,248	0,742	0,148	0,589	0,154	0,208
56	0,310	0,404	0,306	0,827	0,184	0,712	0,219	0,312
90	0,316	0,346	0,313	0,910	0,150	0,625	0,212	0,340
180	0,369	0,350	0,331	1,058	-0,125	0,379	0,117	0,484
270	0,362	0,450	0,361	1,044	-0,931	0,394	-0,025	0,463
365	0,459	0,515	0,417	1,162	-0,884	0,471	0,029	0,487
730	0,562	0,794	0,590	1,419	-0,806	0,734	0,185	0,577
1095	0,580	0,894	0,713	1,638	-0,830	0,828	0,247	0,669
1460	0,612	1,092	0,969		-0,888	0,913	0,648	

Tabelle A19: Längenänderung (mm/m) bei Wasserlagerung für HAZ

Alter in d	Bindemittel ohne SM				Schaummörtel			
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	NaCl
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,238	0,406	0,264	0,865	0,164	0,217	0,156	0,440
14	0,294	0,514	0,300	1,067	0,217	0,402	0,225	0,612
21	0,288	0,533	0,346	1,119	0,254	0,473	0,256	0,652
28	0,275	0,510	0,323	1,209	0,283	0,523	0,288	0,673
56	0,411	0,598	0,525	1,373	0,413	0,646	0,437	0,758
90	0,373	0,604	0,486	1,494	0,446	0,677	0,452	0,839
180	0,417	0,715	0,642	1,877	0,518	0,804	0,615	0,925
270	0,467	0,867	0,690	1,858	0,596	0,848	0,732	0,885
365	0,494	0,911	0,708	1,958	0,622	0,860	0,742	0,907
730	0,492	1,086	0,809	2,315	0,678	0,952	0,881	1,073
1095	0,690	1,210	0,965	2,686	0,779	1,087	1,020	1,125
1460	0,798	1,436	1,163		0,884	1,127	1,152	

Tabelle A20: Dehnung in mm (Diff. im Nadelspitzenabstand zur Nullprobe) bei Wasserlagerung für CEM I 42,5 R-HS

Alter in d	Bindemittel ohne SM				Schaummörtel			
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	MgSO ₄	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	MgSO ₄
2	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
7	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5
14	0,5	0,5	1,0	1,0	0	0,5	1,0	1,0
21	0,5	0,5	1,5	1,5	0	0,5	1,0	1,0
28	1,0	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,0	1,5
56	1,0	1,0	2,0	2,5	0,5	1,0	1,5	2,0
90	1,0	1,5	2,5	3,0	0,5	2,0	2,0	3,0
180	1,0	2,0	3,0	4,5	0,5	2,0	2,0	4,0
270	1,0	3,0	3,5	5,5	0,5	2,5	2,5	4,5
365	1,0	4,0	4,5	7,0	1,0	4,0	4,0	5,5
730	1,5	5,5	6,0	8,0	1,5	4,0	4,0	5,5
1095	1,5	8,5	6,0	8,5	1,5	4,0	4,0	5,5

Tabelle A21: Dehnung in mm (Diff. im Nadelspitzenabstand zur Nullprobe) bei Wasserlagerung für CEM III/B 32,5- NW/HS

Alter in d	Bindemittel ohne SM				Schaummörtel			
	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	MgSO ₄	o. Salz	KNO ₃	CaSO ₄	MgSO ₄
2	0,5	1,0	0	2,5	0	0	0	0
7	1,5	2,0	0,5	21,5	0	0	0,5	1,5
14	1,5	2,5	2,0	27,5	0,5	0	1,5	2,5
21	1,5	2,5	3,0	29,0	0,5	0	1,5	2,5
28	2,0	3,0	3,5	30,0	0,5	0	2,0	2,5
56	2,0	3,0	5,5	34,5	0,5	0,5	2,5	5,5
90	2,0	3,5	7,0	37,5	0,5	0,5	4,0	10,5
180	2,0	3,5	12,0	50	0,5	1,0	5,5	16,5
270	2,0	4,0	12,5	60	0,5	1,0	6,0	24,5
365	2,0	4,5	13,0	64	0,5	1,0	6,5	33,5
730	2,0	5,5	13,5	76,5 ¹⁾	0,5	1,0	6,5	44 ¹⁾
1095	2,5	6,0	14,0	-	0,5	1,0	7,5	-

1) ... PK zerstört

Tabelle A22: Längenänderung ###I des CEM I 42,5 R-HS mit Natursteinen bei Feuchtlagerung in mm/m

Alter in d	Nullprobe		GS		SS		MK		TR	
	BMpur	SM	BMpur	SM	BMpur	SM	BMpur	SM	BMpur	SM
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	-0,01	-0,11	-0,12	-0,05	-0,09	-0,07	-0,05	-0,05	-0,12	-0,06
14	-0,08	-0,11	-0,13	-0,09	-0,14	-0,09	-0,06	-0,07	-0,12	-0,06
21	-0,12	-0,11	-0,11	-0,09	-0,14	-0,13	-0,07	-0,10	-0,14	-0,06
28	-0,14	-0,15	-0,08	-0,07	-0,15	-0,13	-0,05	-0,09	-0,12	-0,06
56	-0,15	-0,18	-0,12	-0,08	-0,19	-0,15	-0,11	-0,09	-0,15	-0,07
90	-0,13	-0,16	-0,10	-0,07	-0,20	-0,18	-0,09	-0,10	-0,13	-0,12
180	-0,15	-0,18	-0,14	-0,08	-0,22	-0,12	-0,16	-0,13	-0,16	-0,06
270	-0,21	-0,30	-0,10	-0,24	-0,17	-0,44	-0,08	-0,21	-0,12	-0,28
365	-0,21	-0,34	-0,07	-0,12	-0,16	-0,22	-0,08	-0,16	-0,11	-0,13
730	-0,21	-0,34	-0,10	0,09	-0,14	-0,25	-0,12	-0,26	-0,14	-0,14

Tabelle A23: Längenänderung ###I des CEM I 42,5 R mit Natursteinen bei Feuchtlagerung in mm/m

Alter in d	Nullprobe		GS		SS		MK		TR	
	BMpur	SM	BMpur	SM	BMpur	SM	BMpur	SM	BMpur	SM
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	-0,04	-0,02	-0,13	-0,01	-0,14	-0,04	-0,09	-0,05	-0,12	-0,04
14	-0,15	-0,03	-0,27	-0,09	-0,23	-0,08	-0,24	-0,11	-0,22	-0,08
21	-0,13	-0,06	-0,20	0	-0,22	-0,04	-0,18	-0,05	-0,18	-0,03
28	-0,15	-0,04	-0,18	-0,01	-0,20	-0,03	-0,14	-0,06	-0,18	-0,04
56	-0,13	-0,08	-0,07	0,16	-0,14	0,05	-0,09	0,03	-0,12	0,06
90	-0,10	-0,03	0	0,20	-0,06	0,05	-0,01	0,06	-0,02	0,08
180	0,05	0,07	0,01	0,25	-0,17	0,02	-0,08	0,04	-0,04	0,11
270	0,05	0,02	0,02	0,15	-0,11	-0,06	-0,04	-0,17	0,02	-0,01
365	0,02	-0,11	0,12	0,31	-0,06	-0,04	0	0	0,06	0,14
730	0,02	-0,10	3,66	-	-0,02	-0,21	0,06	0,08	0,13	0,10

Tabelle A24: Längenänderung ###I/1 des CEM III/B 32,5-NW/HS mit Natursteinen bei Feuchtlagerung in mm/m

Alter in d	Nullprobe		GS		SS		MK		TR	
	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,21	0,21	-0,10	-0,02	-0,12	0,03	-0,10	-0,02	-0,01	-0,03
14	0,20	0,21	-0,34	-0,07	-0,35	0,04	-0,33	-0,12	-0,33	-0,03
21	-0,02	-0,01	-0,26	-0,18	-0,38	-0,07	-0,38	-0,21	-0,37	-0,14
28	0,01	-0,05	-0,11	-0,27	-0,29	-0,26	-0,37	-0,34	-0,31	-0,34
56	-0,19	-0,03	-0,03	-0,26	-0,22	-0,28	-0,27	-0,28	-0,23	-0,27
90	-0,20	0,05	-0,01	-0,24	-0,18	-0,39	-0,22	-0,24	-0,17	-0,30
180	0,09	0,01	-0,07	-0,27	-0,39	-0,38	-0,43	-0,24	-0,36	-0,30
270	0,04	0,13	0,17	-0,74	-0,17	-1,03	-0,19	-0,74	-0,12	-0,79
365	-0,17	0,13	0,23	-0,48	-0,07	-0,68	-0,10	-0,41	-0,04	-0,55
730	-0,17	0,13	0,46	-0,41	0,06	-0,61	0,01	-0,43	0,10	-0,50

Tabelle A25: Längenänderung des HAZ mit Natursteinen bei Feuchtlagerung in mm/m

Alter in d	Nullprobe		GS		SS		MK		TR	
	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM	BM _{pur}	SM
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,15	0,08	0	0,01	-0,02	0,01	0,01	-0,02	-0,01	0,01
14	0,22	0,16	-0,04	0,04	0,02	0,02	-0,02	0,01	0	0,06
21	0,22	0,13	-0,03	0,01	-0,03	-0,01	-0,01	-0,02	0	0,06
28	0,24	0,15	-0,04	0,01	-0,02	-0,02	0	-0,03	-0,03	0,07
56	0,31	0,18	-0,01	0,03	0,02	0,04	0,05	-0,02	0,05	0,08
90	0,32	0,15	0,03	0,17	0,03	0,07	0,09	0,06	0,04	0,14
180	0,35	-0,12	-0,05	0,09	-0,03	0,07	0,03	0,05	0,04	0,12
270	0,36		0,03	0,08	0,08	-0,04	-	-0,10	0,10	0,03
365	0,36		0,16	0,09	0,21	0,05	0,19	-0,11	0,21	0,10
730	0,36		0,23	0,12	0,26	0,15	0,13	0,07	0,32	0,09

Tabelle A26: Differenz der Längenänderung der SL und WL- Proben in mm/m

Prüfdauer in d	HAZ			CEM I 42,5 R-HS		
	BM _{pur}	SM 2 : 1	SM 1 : 1	BM _{pur}	SM 2 : 1	SM 1 : 1
4	0	0	0	0	0	0
7	-0,04	-0,01	-0,04	0,03	0,13	0,10
21	-0,06	0	-0,06	0,04	0,07	0,21
28	-0,07	-0,01	-0,01	0,03	0,10	0,18
56	-0,06	0	-0,06	0,095	0,13	0,16
90	0	-0,02	-0,07	0,10	0,23	0,22
300	-0,01	0	-0,02	0,11	0,33	0,34

Traß-Mehl Meurin (angemacht mit gesättigter Ca(OH) ₂ -Lösung)							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	n.b.
Quarz	++++	++++	++++	++++	++++	++++	-
Albit	++	++	++	++	++	++	-
Orthoklas	+	+	+	+	+	+	-
Calcit	+	+	+	+	+	+	-
Analcim	++	++	++	++	++	++	-
Kaolinit	+	+	+	+	+	+	-
Muskovit/Illit	+	+	+	+	+	+	-
Chabasit	++	++	++	++	++	++	-
Diopsid	+	+	+	+	+	+	-
Anhydrit	-	-	-	+	+	-	-
Gips	-	-	-	++	++	-	-

+ = geringe Intensität ++++ = hohe Intensität - = nicht nachgewiesen (+) = Nachweis unsicher

Traß-Kalk Meurin							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Quarz	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Anorthit/Albit	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
Calcit	+	+	+	+	+	++	+
Alit	++	-	-	-	-	-	-
Anhydrit	+	-	-	-	-	-	-
Gips	+	-	-	-	-	-	+
Portlandit	+	++	+	+	+	+	+
Analcim	++	++	++	++	++	++	++
Kaolinit/Illit	-/+	-	-	-	-	-	-
Ettringit	-	+	+	++	++	+	++
Orthoklas	(+)	+	+	+	+	+	+
Muskovit/Illit	(+)	+	+	+	+	+	+
Diopsid	(+)	+	+	+	+	+	+

Traß-Mehl Märker (angemacht mit gesättigter Ca(OH) ₂ -Lösung)							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	n.b.
Quarz	++++	++++	++++	++++	++++	++++	-
Anorthit/Albit	+	+	+	+	+	+	-
Biotit	+	+	+	+	+	-	-
Montmorillonit	+	+	+	+	+	+	-
Diopsid	+	+	+	+	+	+	-
Anhydrit	-	-	-	+	+	-	-
Gips	-	-	-	++	++	-	-

Traß-Kalk Märker							
	unhydra- tisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Quarz	+	+	+	+	+	+	+
Anorthit/Albit	+	+	+	+	+	+	+
Calcit	++++	++++	++++	++++	++++	++++	+++
Portlandit	+	++	++	+++	++	+++	+
Alit	+	+	+	+	+	+	+
Gips	-	+	+	+	-	+	+++
Ettringit	-	-	-	+	+	-	++

Traß-Hochofenzement (Tubag 393)							
	unhydra- tisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Quarz	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Calcit	+	+	+	+	+	++	+
Alit	+	-	-	-	-	-	-
Herschelit	+	+	+	+	+	+	+
Analcim	++	++	++	++	++	++	++
Mullit	+	+	+	+	+	+	+
Muskovit/Illit	+	+	+	+	+	+	-
Gips	-	-	-	+	+	-	-
Ettringit	-	+	+	++	++	+	+
Portlandit	-	+	+	-	-	+	+

HÜS Dortmund (angemacht mit gesättigter Ca(OH) ₂ -Lösung)							
	unhydra- tisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Calcit	-	+	+	+	+	+++	+
Vaterit	-	-	-	-	-	+	-
Gips	-	-	-	-	+	-	-
Ettringit	-	-	-	++	++	-	-

HÜS Holland (angemacht mit gesättigter Ca(OH) ₂ -Lösung)							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Calcit	-	+	+	+	+	+++	++
Vaterit	-	-	-	-	-	+	-
Anhydrit	-	-	-	-	+	-	-
Ettringit	-	-	-	+++	+++	-	++

HAZ							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Alit	+++	++	++	++	++	++	++
Anhydrit	++++	+	+	++	+++	-	+
Gips	++	-	-	++	++	+	+
Calcit	-	++	-	+	-	+++	++
Ettringit	-	++	+	++	++	++	++
Quarz	-	+	+	+	+	-	-

CEM III / B 32,5 - NW / HS							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Calcit	+	+	+	+	+	+	+
Alit	++++	+	+	+	+	+	+
Anhydrit	++++	+	+	+	+	+	-
Merwinitt	++	++	++	++	++	++	++
Gips	-	-	-	+	+	-	+
Ettringit	-	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Portlandit	-	++	+	++	+	+	+
Akermanit/Alunit	-	-	-	-	-	(+)	-

SFA (angemacht mit gesättigter Ca(OH) ₂ -Lösung)							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	-
Quarz	+++	+++	+++	+++	+++	+++	-
Mullit	++++	+++	+++	+++	+++	+++	-
Anhydrit	+	-	-	-	+++	-	-
Gips	-	-	-	++++	+++	-	-
Ettringit	-	++	++	++	++	-	-

CEM II / A-V 32,5 R							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Quarz	+	+	+	+	+	+	+
Calcit	+	+	+	+	+	+	+
Alit	++++	++	++	++	++	++	++
Belit (Larnit)	++	++	++	++	++	++	++
Brownmillerit	+	+	+	+	+	+	+
Calciumaluminat	+	+	+	+	+	+	+
Anhydrit	+	-	-	+	+	-	-
Gips/Bassanit	-/+	-	-	-	-	-	+/-
Ettringit	-	-	-	+	+	+	+
Monosulfat	-	-	-	-	-	+	+
Portlandit	-	+++	+++	+++	+++	+++	+++

CEM I 42,5 R							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Alit	++++	++	+	+	+	+	+
Belit (Larnit)	++	++	+	+	+	+	+
Brownmillerit	+	+	+	+	+	+	+
Calciumaluminat	++	+	+	+	+	+	+
Anhydrit	++	-	-	+	+	-	-
Periklas	+	+	+	+	+	+	+
Gips	-	-	-	-	-	-	+
Ettringit	-	-	-	+	+	+	+
Portlandit	-	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Calcit	(+)	+	+	+	+	+	+

CEM I 42,5 R-HS							
	unhydratisiert	90d hydratisiert		+Gips, 90d hydratisiert		28d hydratisiert, dann	
		5°C	25°C	5°C	25°C	56d WL	56d SL
Alit	++++	+	+	+	+	+	+
Belit (Larnit)	+	+	+	+	+	+	+
Brownmillerit	+	+	+	+	+	+	+
Gips	+			+	+		+
Anhydrit				+	+		
Ettringit				+	+	+	+
Monosulfat							+
Portlandit		++	+++	++	+++	++	++
Calcit	(+)	+	+	+	+	+	+

Bild A1: CEM I 42,5 R-Schaummörtel + KNO_3 nach 2 a Wasserlagerung



Bild A2: CEM I 42,5 R-Schaummörtel + MgSO_4 nach 1 1/2a Feuchtlagerung



Bild A3: Oberfläche des CEM I 42,5 R + CaSO_4 nach 90d WL in 8facher Vergrößerung

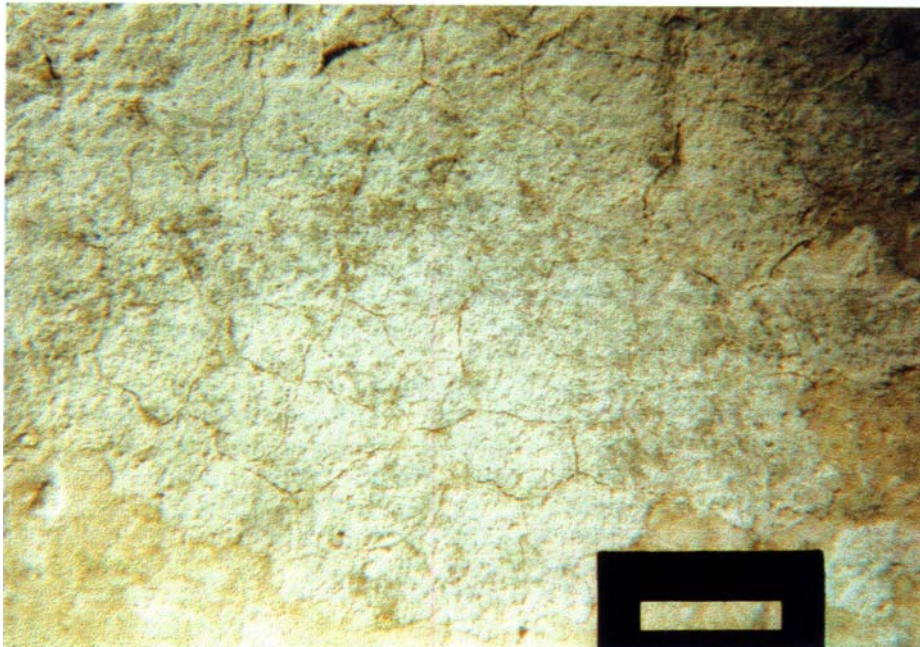


Bild A4: CEM III/B 32,5-NW/HS-Schaummörtel + MgSO₄ nach 1 1/2 a Wasserlagerung

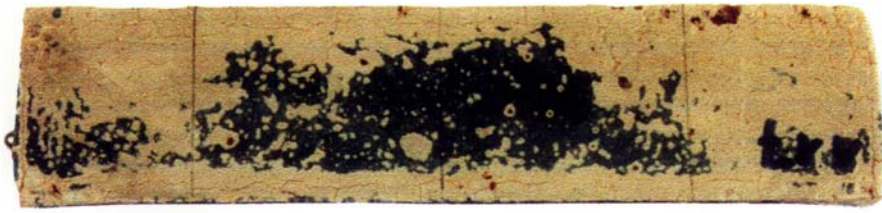
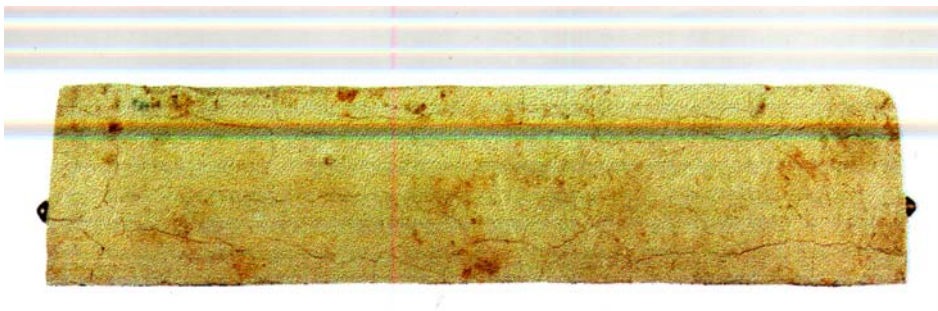


Bild A5: CEM III/B 32,5-NW/HS-Schaummörtel + MgSO₄ nach 1 1/2 a



Feuchtlagerung

Bild A6: KNO₃-Kristalle auf der Oberfläche von HAZ-SM bei Feuchtlagerung, 50fache Vergrößerung

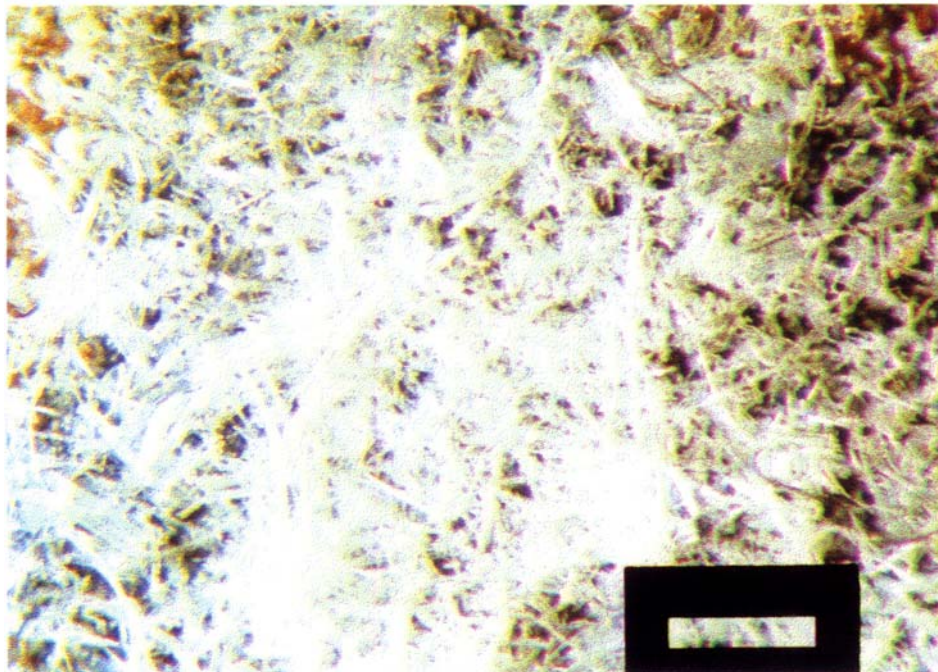


Bild A7: CEM III/B 32,5-NW/HS+ MgSO₄ und +NH₄NO₃ (Le-Chatelier-Ringe)



Bild A8: Risse im Romankalk mit NH₄NO₃ nach 180d Wasserlagerung

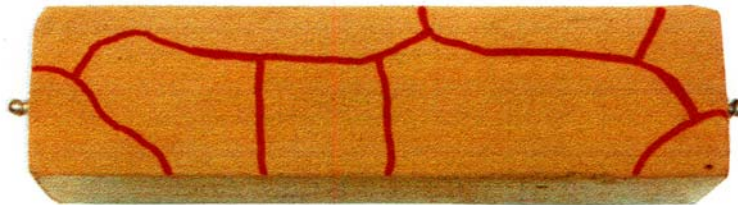


Bild A9: Prismen aus CEM I 42,5 R mit eingebettetem Gipsstein; durch Reaktionen an den Phasengrenzflächen ging der Haftverbund verloren



Bild A10: Thaumazitbildung an der Phasengrenzfläche zwischen CEM I 42,5 R-SM und Gipsstein; REM-Aufnahme: linke Bildhälfte in 100facher Vergrößerung

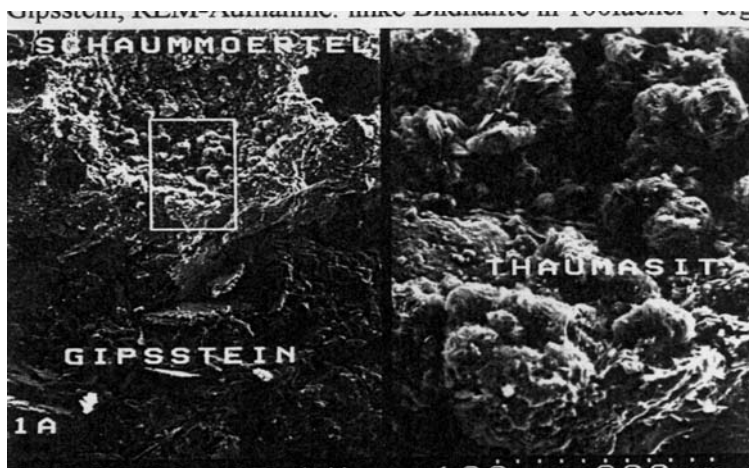


Bild A11: Pore im HAZ-SM nach 56 d Sulfatlagerung mit feinen Ettringitnadeln an der Porenwand; REM-Aufnahme in 600facher Vergrößerung

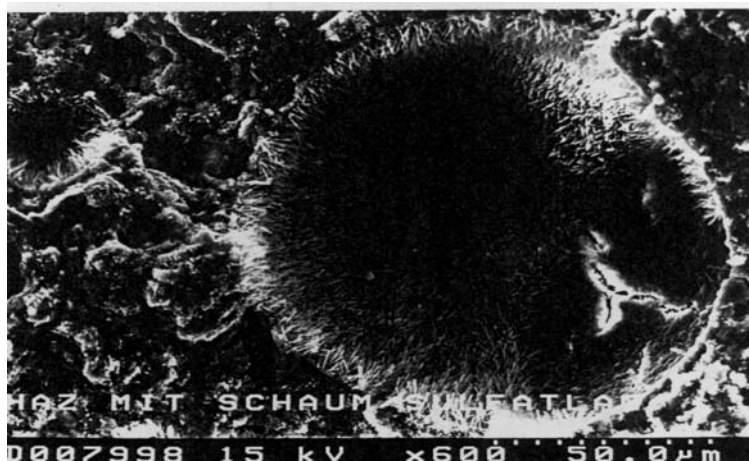
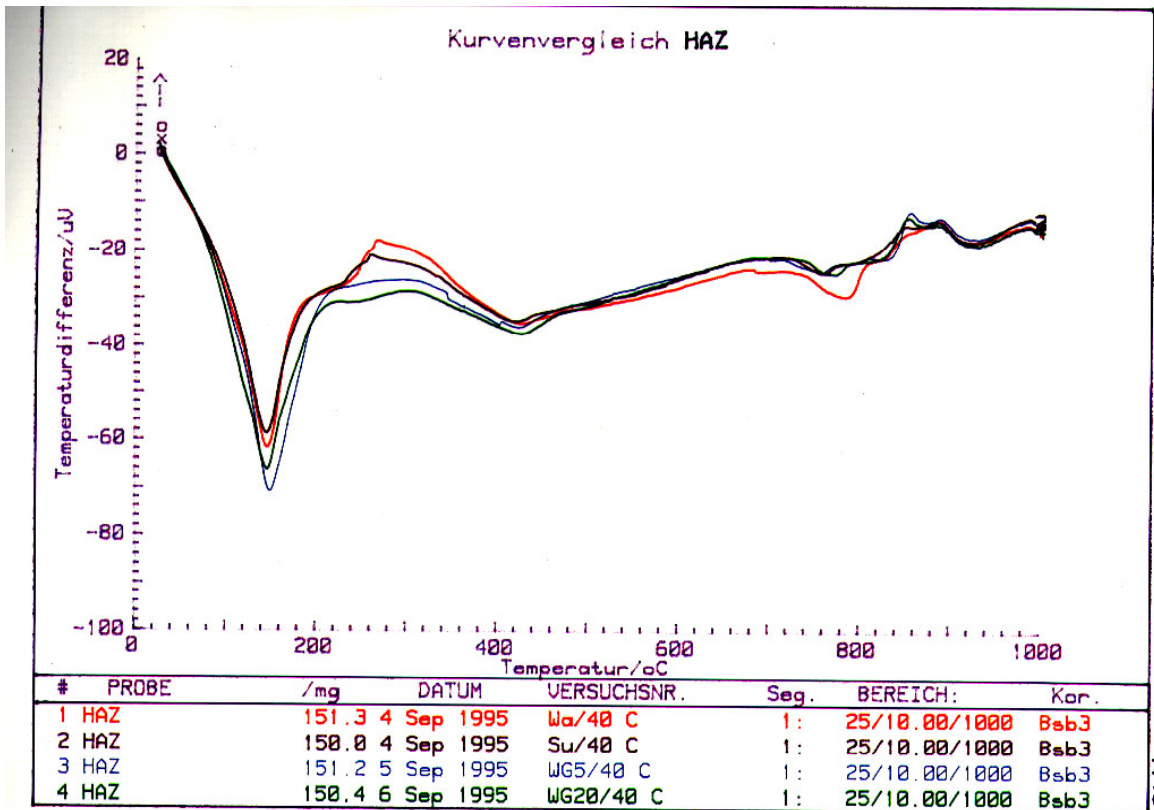
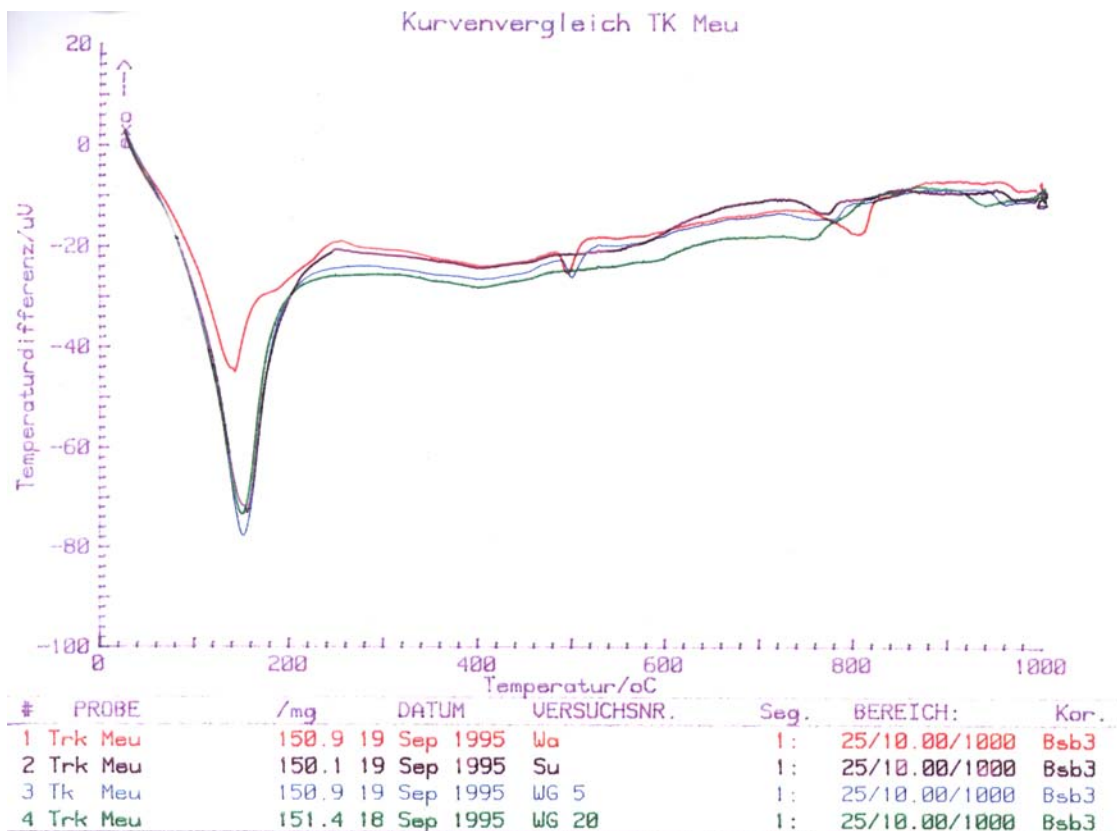


Bild A12: Pore im CEM I 42,5 R-HS-SM nach 56 d Sulfatlagerung; REM-Aufnahme in 600facher Vergrößerung





A 13



Tabellarischer Lebenslauf: Stürmer, Sylvia geb. Kupfer

Persönliche Angaben

Familienstand: verheiratet, 2 Kinder
Staatsangehörigkeit: BRD
Geb.: 28.03.1964
Geburtsort: Naumburg a. d. Saale

Ausbildung

Allgemeinbildende Oberschule vom 01.09.70 bis 30.06.78
Erweiterte Oberschule vom 01.09.78 bis 30.06.82
- Hochschulreife -

Vorpraktikum als Voraussetzung für
das Hochschulstudium als Laborant
in der Keramikabteilung des VEB Holz-
und Kulturwaren Naumburg vom 01.09.82 bis 31.08.83

Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar
- Hochschulstudium mit Abschluß als
Diplomingenieur für Baustoffverfahrenstechnik -
vom 01.09.83 bis
08.02.89

Weiterbildung

Forschungsstudium an der Hochschule für Architektur
und Bauwesen Weimar, Wissenschaftsbereich
für Baustoffkunde vom 09.02.89 bis 31.08.91

Studienaufenthalt an der RWTH Aachen,
Institut für Gesteinskunde,
Lehrgebiet für Bindemittel bei
Professor Dr. Ing. U. Ludwig vom 01.04.90 bis 30.05.90

Ausgeübte Tätigkeit

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Finger-Institut für Baustoffkunde
der Bauhaus-Universität Weimar seit 1991