

Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau
Structural Materials and Engineering Series

Heft 6
No. 6

**Gefügeoptimierte Instandsetzungsmörtel
auf Calciumsulfat-Basis
für die Anwendung im Außenbereich**

Viola Tesch

Diese Arbeit entstand am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens als eine vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel genehmigte Dissertation

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmidt
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf
Dritter Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Oktober 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2006
ISBN 978-38958-333-5
URN urn:nbn:de:0002-3331

© 2007 kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt
Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens
Mönchebergstr. 7
34125 Kassel
Tel. +49 (561) 804 2601
Fax +49 (561) 804 2662
baustk@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/fb14/baustoffkunde

Prof. Dr.-Ing. E. Fehling
Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Massivbau
Mönchebergstr. 7
34125 Kassel
Tel. +49 (561) 804 2656
Fax +49 (561) 804 2803
bauing.massivbau@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/fb14/massivbau

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel
Printed in Germany

Vorwort der Herausgeber

Schon im vorchristlichen Altertum wurden calciumsulfatgebundene Baustoffe als Estrichgips und Mörtel verwendet. Und trotz der hohen Wasserlöslichkeit wurden sie auch im Außenbereich zahlreicher kulturhistorisch bedeutender Bauwerke eingesetzt. Diese Mörtel weisen zum Teil noch heute einen guten Erhaltungszustand auf. Müssen Sie instand gesetzt werden, so sind dafür verwitterungsresistente und mit dem historischen Baustoff verträgliche Mörtel erforderlich.

Der vorliegende 6. Band der Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau beschreibt die umfangreichen Untersuchungen und Betrachtungen, die Frau Dr. Viola Tesch im Rahmen ihrer am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens bearbeiteten Dissertation mit dem Ziel angestellt hat, die Grundlagen für die Entwicklung solcher Instandsetzungsmörtel zu schaffen.

In der Arbeit werden Wege aufgezeigt, wie das Gipsmörtelgefüge durch die gezielte Auswahl und Kombination der Bindemittelkomponenten sowie durch die Zugabe von mineralischen Zusatzstoffen, Zusatzmitteln und Gesteinskörnungen objektbezogen so optimiert werden kann, dass der Instandsetzungsmörtel ausreichend verarbeitbar, fest und dauerhaft wird. Die Untersuchungen ermöglichen es, anforderungsgerechte Instandsetzungsmaterialien auf der Basis von CaSO_4 auch in industrieller Fertigung gezielt und zuverlässig herzustellen.

Kassel, im Juni 2007

Die Herausgeber

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Ziel	1
2	Stand des Wissens.....	3
2.1	Das System $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$	3
2.2	Charakterisierung historischer Gips- und Gips-Kalkmörtel.....	9
2.3	Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat- Basis.....	13
2.4	Historisches gipshaltiges Mauerwerk	18
2.5	Transportmechanismen von Feuchtigkeit im Mörtel	27
3	Anforderungen an Instandsetzungsmörtel	36
3.1	Allgemeine Anforderungen.....	36
3.2	Untersuchungsergebnisse historischer Mörtel aus beprobten Gebäuden ..	38
3.3	Beispiel für ein objektbezogenes Anforderungsprofil.....	45
3.4	Mörtelkonzept.....	47
4	Untersuchungsprogramm zur Entwicklung eines Instandsetzungsmörtels auf Calciumsulfat- Basis.....	48
4.1	Komponentencharakterisierung	48
4.2	Frischmörteleigenschaften	48
4.3	Herstellung und Lagerung der Proben	50
4.4	Festmörteleigenschaften	50
4.5	Gefüge und Porosität	53
4.6	Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie	54
4.7	Verwitterungsresistenz	55
4.8	Darstellung der Mörtelgefüge mit „Pore-Cor“	56
5	Laborversuche.....	57
5.1	Ausgangsstoffe	57
5.2	Messung der Verwitterungsresistenz	67
5.3	Optimierung der Sieblinie	77
5.4	Optimierung des Wasserrückhaltevermögens.....	83
5.5	Untersuchung unterschiedlich feuchtebeanspruchter Gips-Kalk Mörtel	87
5.6	Thaumasitbildung in Gips-Kalk Mörteln.....	100
5.7	Bauwerksapplikation	111
5.8	Diskussion der Ergebnisse.....	112
6	Zusammenfassung und Ausblick	119

7	Literaturverzeichnis	121
8	Anhang	130

1 Einleitung und Ziel

Die Verwendung calciumsulfatgebundener Baustoffe lässt sich über einen langen Zeitraum bis in das vorchristliche Altertum zurückverfolgen [1]. Ab dem frühen Mittelalter gewann der Gebrauch von Gips auch in Mitteleuropa in Form von Estrichgips und Mörtel an Bedeutung. Neben der einfachen Herstellung waren insbesondere mörteltechnische Eigenschaften für die Verwendung von Gips als Bindemittel ausschlaggebend. Einfache Verarbeitung und eine schnelle Festigkeitsentwicklung ermöglichten einen schnellen Baufortschritt und die Konstruktion von komplexen Bauteilen wie Bögen und Gewölbe [2]; wodurch Gips- und Gips-Anhydrit-Kalk Mörtel in Europa vorwiegend im Sakralbau eine lange Tradition haben. In Deutschland sind die historischen Zentren der Gipsnutzung an die Umgebung von Gipslagerstätten gebunden. Zu nennen sind der Harz, das Thüringer Becken, Franken sowie die Umgebung der sogenannten Kalkberge von Lüneburg und Bad Segeberg.

Trotz der hohen Wasserlöslichkeit von 2,6 g/l [3, 4] wurden calciumsulfatgebundene Mörtel in zahlreichen kulturhistorischen Gebäuden der oben genannten Regionen auch im Außenbereich eingesetzt. Diese Mörtel weisen auch heute noch einen sehr guten Erhaltungszustand auf. Die Schwierigkeit heutiger Instandsetzungen historischer Gebäude, die mit calciumsulfatgebundenen Bindemitteln errichtet wurden, besteht darin, dass die Informationen über die Zusammensetzung der historischen Mörtel, wie Ausgangsstoffe, Brennverfahren, eingesetzte Additive und Verarbeitungstechniken mit dem Einzug der hydraulischen Bindemittel Anfang des 19. Jahrhunderts verloren gegangen sind [5, 6]. Für Instandsetzungsarbeiten dieser Gebäude wurden daher in der Mitte des letzten Jahrhunderts ungeachtet der vorhandenen Bausubstanz Mörtel auf der Basis von Zement eingesetzt. Bei diesen Instandsetzungsmaßnahmen kam es aufgrund von Inkompatibilitäten der historischen und der Instandsetzungsmaterialien zu umfangreichen Schäden [7]. Um jegliches Risiko von Unverträglichkeiten auch über lange Zeiträume auszuschließen, erscheinen heute materialauthentische Instandsetzungen mit verwitterungsresistenten Gipsbaustoffen als der geeignetste Weg. Ein Weg zu dieser Realisierung ist die Nachstellung der Bindemittel nach historischem Vorbild. Es liegen aber keinerlei Informationen über das verwendete Material, der Aufbereitung und Herstellung sowie der Verarbeitung vor, so dass man heute überwiegend den Ansatz

verfolgt, industriell verfügbare und qualitätskontrollierte CaSO_4 -Bindemittel zur Herstellung von Instandsetzungsmörteln einzusetzen. Da die zur Zeit am Markt verfügbaren Mörtel auf Calciumsulfatbasis aufgrund ihrer hohen Löslichkeit nur bedingt den Kompatibilitätskriterien entsprechen, besteht ein Bedarf für kompatible und verwitterungsresistente Instandsetzungsmörtel auf CaSO_4 -Basis.

Ausgehend von phasen- und gefügeanalytischen Ergebnissen von historischen CaSO_4 -gebundenen Mörteln und bisherigen Laborentwicklungen [3; 8] soll eine systematische Verbindung zu den Anforderungen hergestellt werden, die das Bauwerk an den Instandsetzungsmörtel stellt. Es wird dazu der Zusammenhang zwischen Mechanismen auf mikroskopischer Ebene und der Reaktionskinetik bei der Halbhydrat/Anhydrit-Dihydrat-Transformation und deren Einfluss auf makroskopische Materialkennwerte von hydratisierten Gipsmörteln (Festigkeit, Permeabilität, Porosität, etc.) untersucht. Die Kinetik der Halbhydrat- bzw. Anhydritauflösung und die anschließende Kristallisation des Dihydrats ist letztlich für das Gefüge und die damit zusammenhängenden physikalisch-mechanischen und chemisch-mineralogischen Baustoffeigenschaften maßgeblich verantwortlich.

Es werden in dieser Arbeit Wege aufgezeigt, wie Gipsmörtel durch Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln objektbezogen optimiert werden können. Schwerpunkt ist die gezielte Optimierung der Struktur der Gipsmörtelgefüge, einerseits durch Zusatzmittel und andererseits durch gezielte Wahl und Kombination der Bindemittel und der Gesteinskörnungen.

Die angestrebten Eigenschaften der Instandsetzungsmaterialien auf CaSO_4 -Basis sollen letztendlich gezielt und zuverlässig in industrieller Fertigung erreicht werden. Diese Aufgabe kann nur gelöst werden, wenn die grundsätzlichen Beziehungen zwischen der Gipshydratation, deren Steuerbarkeit, dem entstehenden Gefüge, dem daraus resultierenden Witterungswiderstand und den mechanischen Mörtелеigenschaften bekannt sind.

2 Stand des Wissens

2.1 Das System $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$

Gips kann in den Phasen CaSO_4 -Dihydrat, CaSO_4 -Halbhydrat und CaSO_4 -Anhydrit vorliegen. Das Calciumsulfat-Dihydrat bildet bei fast allen verfahrenstechnischen Vorgängen das Ausgangsprodukt vor der Dehydratation und das Endprodukt nach der Rehydratation, und ist unter atmosphärischen Druck- und Temperaturbedingungen bei mäßiger Feuchtigkeit die einzige stabile Phase [9]. Bei der Kristallisation bildet Gips vorwiegend säulige bis tafelige Kristalle aus. Die Struktur von Gips zeigt einen schichtartigen Aufbau, wobei die Schichten aus SO_4^{2-} - und Ca^{2+} -Ionen und Wassermolekülschichten bestehen, die parallel (010) angeordnet sind [3]. Neben den natürlichen Vorkommen fällt Dihydrat auch als Nebenprodukt technischer Prozesse an [9]. Die Rauchgasentschwefelung (REA) in Kohlekraftwerken hat dabei wohl die größte Bedeutung [9].

Bedingt durch eine definierte thermische Beanspruchung bildet sich durch Abgabe von 1,5 Wassermolekülen aus dem Kristallgitter des Dihydrats Halbhydrat. Natürliches Halbhydrat mit dem Mineralnamen Bassanit ist überaus selten, da Halbhydrat bereits bei normalen Klimabedingungen wieder Wasser in sein Kristallgitter einbindet und zu Dihydrat rehydratisiert. Die meiste Bedeutung kommt heute dem technisch erzeugten Halbhydrat zu [10], welches durch unterschiedliche Herstellungsprozesse in α - oder β - Modifikationen vorliegen kann. Diese beiden Modifikationen unterscheiden sich optisch in ihrer Kristallform (vergl. hierzu Tab. A 2.1 im Anhang A 2); während α - Halbhydrat (α -HH) idiomorphe, kompakt prismatische Einkristalle bildet, zeigt das β - Halbhydrat (β -HH) flockige, schuppige bis zerklüftete Aggregate [9].

Anhydrit lässt sich weitgehend in drei unterschiedliche Phasen einteilen, in Anhydrit I, Anhydrit II und Anhydrit III. Anhydrit III entsteht durch Entwässerung des technisch hergestellten Halbhydrats und liegt ebenfalls in α - und β - Modifikationen vor (vergl. Tab. A 2.1). Es unterscheidet sich vom Halbhydrat durch den niedrigeren Kristallwassergehalt und ist sehr reaktionsfreudig; es rehydratisiert unter atmosphärischen Klimabedingungen zu Halbhydrat. Anhydrit II entsteht durch weitere Erhöhung der Brenntemperatur und entspricht dem Naturanhydrit [9]. Nach [9] lässt sich Anhydrit II nochmals in schwerlöslich (A-II-s), unlöslich (A-II-u) und Estrichgips

(A-II-E) unterteilen und benötigt zu seiner Reaktion zur Rückführung in Halbhydrat und Dihydrat einen Anreger, da Anhydrit II aufgrund seiner inaktiven Struktur bei Wasserzugabe nur sehr langsam reagiert [10]. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur setzt die Dissoziation des Anhydrit II ein, wobei aus dem Calciumsulfat CaO entstehen kann und das dabei frei werdende SO_3 entweicht. Bei einer anschließenden Hydratation kann somit neben der Rehydratation des Calciumsulfates auch der entstandene Branntkalk durch Reaktion mit dem eingesetzten Wasser zu Calciumhydroxid und weiter durch das Kohlendioxid der Luft zu Calciumcarbonat reagieren. Die kubisch kristallisierende Hochtemperaturmodifikation des Anhydrit I bindet dagegen nicht ab und ist für die technische Anwendung ohne Bedeutung [11].

Nach [12] kann der Abbindeprozess von Gips in drei Stufen unterteilt werden. Bei der Kristallisation von Gips werden während des Einstreuens des Bindemittels in Wasser die Halbhydrat- bzw. Anhydritkristalle angelöst. Es entsteht eine fließfähige Paste, die bezüglich der Ausgangsstoffe chemisch gesättigt ist. Die Fließfähigkeit dieser Gipspaste wird wesentlich vom Wasser-Feststoff-Verhältnis, aber auch von der Mischungsintensität bestimmt [13]. Unter der weiteren Einwirkung des Wassers kommt es in der Nähe der sich schnell auflösenden Halbhydratkristalle infolge seiner geringen Löslichkeit zum Ausfallen von Dihydrat. Das Dihydrat bildet zunächst clusterähnliche Anhäufungen kleinster Kristalle mit dem überschüssigen Wasser. Eine Übersättigung der Suspension bleibt solange bestehen, bis weiteres Halbhydrat/Anhydrit in Lösung geht. Mit der Zeit kristallisieren die agglomerierten, clusterähnlichen Aggregate um, und es bilden sich nadelförmige Dihydratkristalle [12]. Nach [15] ist das Endprodukt der Erhärtung von Halbhydrat- und Anhydritbindern aus chemisch-mineralogischer Sicht als vergleichbar anzusehen.

Alle Prozesse können bis mehrere Stunden (Versteifungsende) nach der erstmaligen Wassereinwirkung auf das Ausgangsgemenge nachgewiesen werden, wobei die Hydratation dann noch nicht abgeschlossen ist. Der kristallisierte Gips enthält interkristallines Wasser, welches erst durch eine Lagerung an Luft abgegeben wird. Mit diesem Austrocknungsprozess ist eine weitere Festigkeitssteigerung verbunden. Als Endzustand der Kristallisation wird ein Zeitpunkt nach etwa einer Woche angesehen [11].

Hydratations- und Gefügemodelle

Bei Betrachtung der Mikrogefüge von historischen, langjährig bewitterten Gipsmörteln fällt auf, dass sie eine grobkristalline Mikrostruktur aufweisen. Verglichen mit heutigen, industriell hergestellten Gipsmörteln, die nicht der Außenbewitterung ausgesetzt waren, haben die historischen Mörtel deutlich gröbere Kristalle die sich auch in Tracht und Habitus von den heutigen Gipsmörteln unterscheiden. Diese Unterschiede sind in Bild 1 dargestellt. Resultierend aus der unterschiedlichen Mikrostruktur sind auch die Porosität und die Porenradienverteilung unterschiedlich. Die Gesamtporosität der in [3, 8, 10] untersuchten historischen Mörtelproben lagen im Mittel bei ca. 25 Vol.-%, während die der Mörtel mit industriell gefertigtem Calciumsulfat- Halbhydrat ca. 40 Vol.-% erreichen konnten.

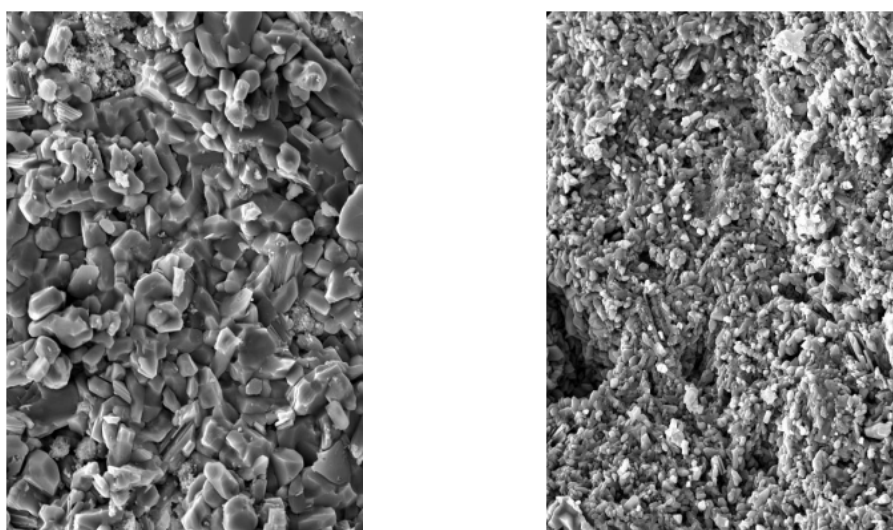


Bild 1: Vergleich der Gefügestruktur eines historischen Gipsmörtels (links) und eines Mörtels mit industriell gefertigtem Calciumsulfat-Halbhydrat (REM-Bilder), Bildbreite 100µm

Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Bindemitteln auf Calciumsulfat-Basis werden durch das Gefüge bestimmt. Durch Untersuchungen an unterschiedlichen Gipsproben im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes wurden grundlegende Zusammenhänge zwischen der Art und Konzentration chemischer Additive, der Halbhydratauflösung, der Keimbildung und des Dihydrat-Wachstums und dessen Auswirkung auf die wesentlichen Gefügeparameter wie Kristallgröße und –form aufgezeigt [29]. Dabei wurde deutlich, dass sich mit gezielten Eingriffen in die Mikrostruktur die mechanischen Eigenschaften einstellen lassen.

Dieser Zusammenhang ist für calciumsulfatgebundene Mörtel in Bild 2 dargestellt. Mit steigendem mittleren Porenradius nahmen die mechanischen Kenngrößen Biegezug- und Druckfestigkeit sowie der dynamische Elastizitätsmodul ab.

Für die Herstellung von Gipsproben nach DIN 1168 wird eine wesentlich höhere Wassermenge eingesetzt, als die Stöchiometrie der Reaktionsgleichung¹ zur Hydratation von Calciumsulfat-Halbhydrat verlangt. Dieses überschüssige Wasser, was zur Verarbeitung benötigt wird, verdunstet und hinterlässt in den abgebundenen Gipspasten ein System zusammenhängender kapillar wirksamer Poren [29]. Mit steigendem Wasser-/Bindemittel-Wert nimmt somit die Gesamtporosität der Proben zu und im gleichem Maße nimmt die Rohdichte ab. In Bild 3 ist der Zusammenhang von Wasser-/Bindemittelwert und mechanischen Eigenschaften graphisch dargestellt. Der Wasser-/Bindemittelwert ist somit eine Steuergröße zur gezielten Einstellung der Porosität, welche wiederum die mechanischen Kenngrößen beeinflusst.

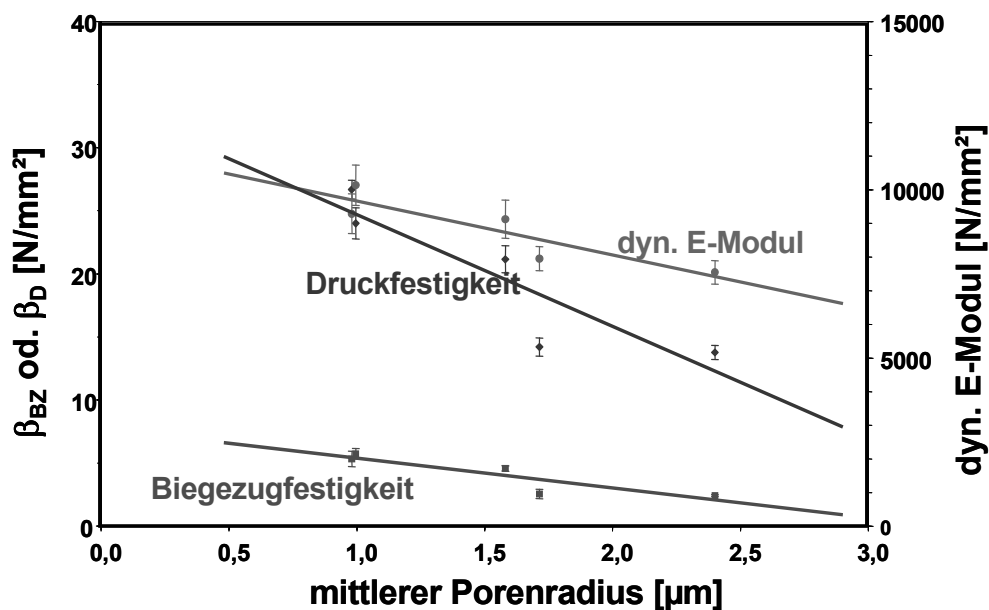


Bild 2: Makroskopische Eigenschaften in Abhängigkeit vom mittleren Porenradius [29]

¹ $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O} + 1,5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

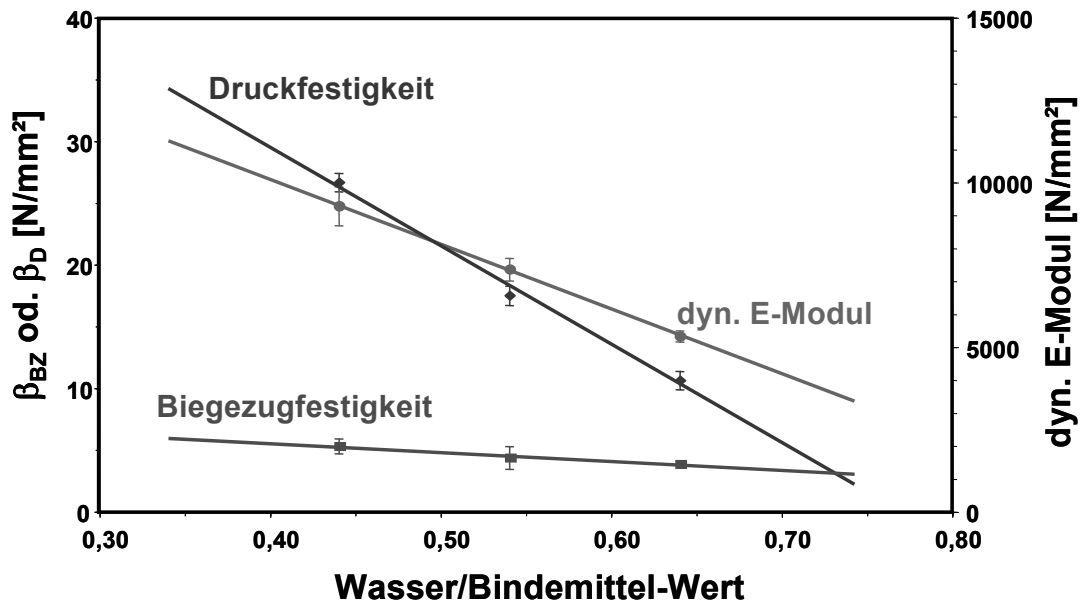


Bild 3: Makroskopische Eigenschaften in Abhängigkeit vom Wasser-/Bindemittel-Wert [29]

Eine weitere Stellgröße zur Einstellung der Mikrostruktur ist die Hydratationsgeschwindigkeit. Der zeitliche Abbindeprozess lässt sich durch Zugabe chemischer Additive einstellen. Als Beispiel ist hier in Bild 4 gezeigt, wie unterschiedliche Carboxylsäuren bei gleicher Zugabemenge die Umwandlung von Calciumsulfathalbydrat in Calciumsulfatdihydrat zeitlich unterschiedlich beeinflussen. Durch die langsamere Abbindegeschwindigkeit und durch die Wechselwirkung der Kristallkeimoberflächen mit dem chemischen Additiv, wobei reaktive Keimzellen blockiert werden, wird das Wachstum der Kristalle (Tracht und Habitus) maßgeblich beeinflusst. Die Kristalle werden größer. Dadurch ändert sich auch der mittlere Porenradius des Mikrogefüges. In Bild 5 ist am Beispiel der Bernsteinsäure dargestellt, wie der mittlere Porenradius mit steigender Zugabemenge zunimmt. In Bild 6 sind vergleichend zwei Mikrogefüge von Gipspasten dargestellt. Das linke Bild zeigt einen hydratisierten Gips, hergestellt aus β -Halbhydrat ohne Zusatzmittel. Das rechte Bild zeigt eine ausgehärtete Gipspaste, welche ebenfalls mit β -Halbhydrat aber mit Zugabe von 0,1% Zitronensäure bezogen auf den Halbhydrat-Anteil hergestellt worden ist. Es ist deutlich erkennbar, dass sich das Mikrogefüge durch Zugabe von chemischen Additiven verändert, da sich dadurch Tracht und Habitus der Kristalle verändern.

(Re-)Hydratation

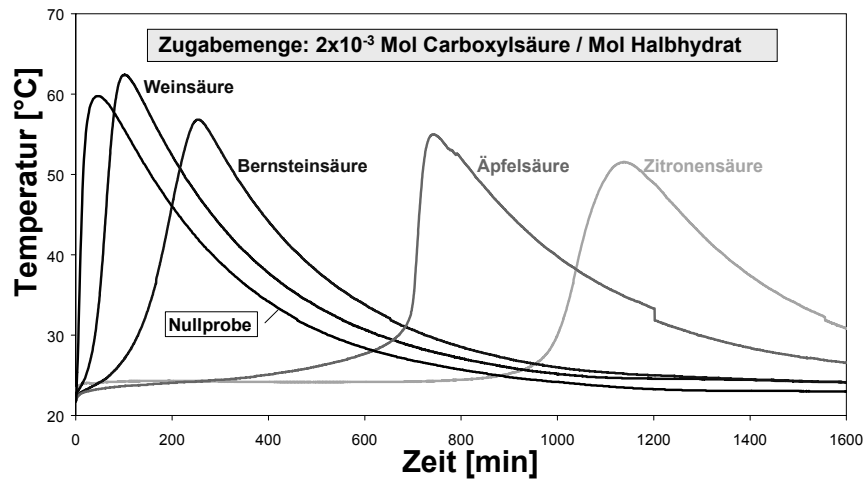
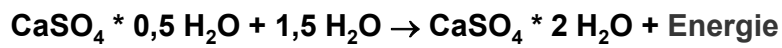


Bild 4: Einfluss unterschiedlicher Carboxylsäuren auf den zeitlichen Verlauf der Hydratation [29]

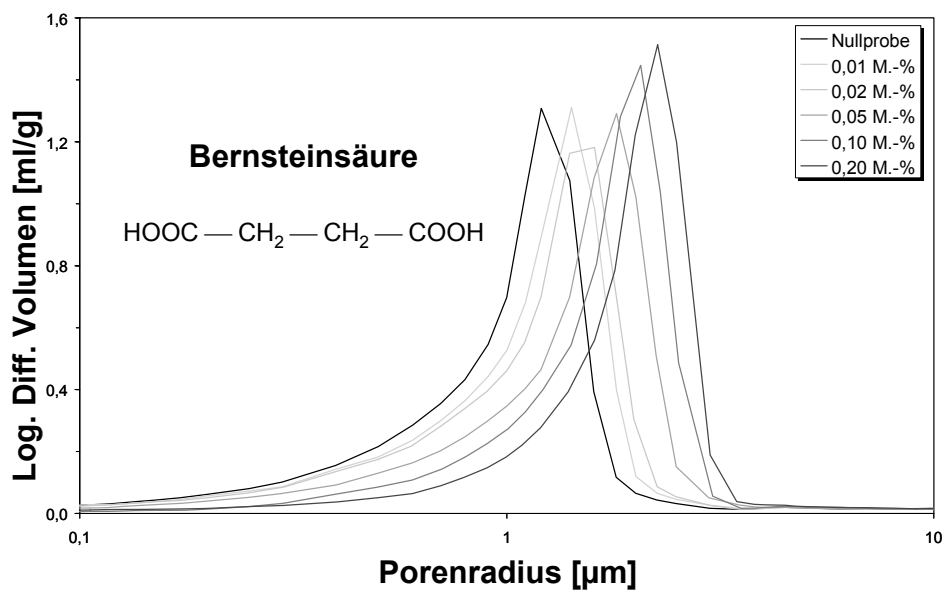


Bild 5: Einfluss der Zugabemenge auf den mittleren Porenradius am Beispiel der Bernsteinsäure [29]

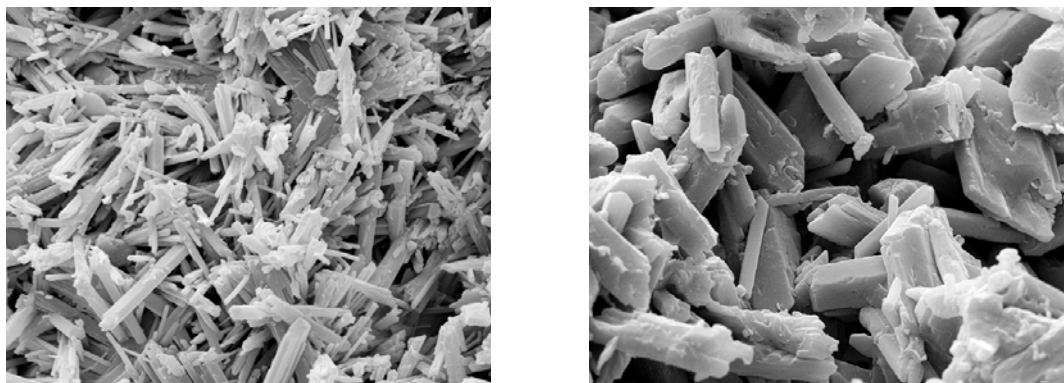


Bild 6: Gips ohne Zusatzmittel (links) und mit Zitronensäure (rechts)
REM-Aufnahme, Bildbreite: 45 μm ; (Fotos: Middendorf [30])

Es lässt sich zusammenfassen, dass mit unterschiedlichen Wasser-/Bindemittelwerten und durch Zugabe chemischer Additive das Mikrogefüge der Calciumsulfatdihydrate beeinflusst werden kann, so dass dadurch die mechanischen Eigenschaften von Gipsmörteln definiert eingestellt werden können.

2.2 Charakterisierung historischer Gips- und Gips-Kalkmörtel

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten [u. a. 3, 4, 6, 8, 10, 11] beschäftigten sich mit der Untersuchung und Charakterisierung historischer Gipsmörtelproben unterschiedlicher Regionen. Sie beschränkten sich auf Regionen, in denen Gipslagerstätten vorkommen. Zu nennen sind das südliche Schleswig- Holstein mit dem Segeberger Gips, sowie Hamburg und Lübeck mit dem Gips vom Lüneburger „Kalkberg“ und die Regionen um den Harz mit dem Harzvorland, dem Thüringer Becken sowie der Windsheimer Bucht in Franken. Geologisch lassen sich die historischen und aktuell genutzten Gipslagerstätten dem Zechstein, Oberen Buntsandstein (Röt), dem Mittleren Muschelkalk und Oberen Jura zuordnen [26].

In [3] wurden zahlreiche Mörtelproben aus historischen Ziegelbauten des norddeutschen und des niederländischen Raumes entnommen und analysiert. Bei den Untersuchungen in [10] lag der Schwerpunkt auf der Region um den Harz mit Teilen von Thüringen, die auch Ansatz der Untersuchungen in [8] waren, während in [4] Bauwerke aus der Windsheimer Bucht betrachtet wurden.

Aufgrund chemischer und mineralogischer Analysen [3, 4, 8, 10] kann gesagt werden, dass alle bis zum jetzigen Zeitpunkt untersuchten historischen Gipsmörtel im

Wesentlichen aus Calciumsulfat- Dihydrat bestanden. Akzessorisch sind Carbonate und/oder Quarze und Feldspäte nachweisbar. Bei den in [10] untersuchten historischen Proben unterschieden sich die Diffraktogramme der röntgenographischen Untersuchung nur hinsichtlich ihrer Reflexintensitäten. Es wurde anhand der Untersuchungen ein Stoffbestand von 90-95 M.-% Gips, < 5 M.-% Anhydrit, < 5 M.-% Carbonat, < 2 M.-% Quarz mit geringen Anteilen an Holzkohle und Ziegelbruchstücken beziehungsweise gebranntem Ton festgestellt. Der Hauptbestandteil Gips war dabei sowohl im Bindemittel als auch in den Gesteinskörnungen zu finden. Nach [10] muss es sich aufgrund der auftretenden Kristallform um das Hydratationsprodukt von Anhydrit handeln, da aus Anhydrit eher gedrungene Kristalle gebildet werden, während aus Halbhydrat vorwiegend langprismatische bis nadelige Formen gebildet werden. Aber schon geringe Mengen an Zusatzmitteln können die Form der gebildeten Kristalle aus Halbhydrat verändern. In [3] wurde gezeigt, dass der Zusatz von 0,1 M.-% Citronensäure zu β - Halbhydrat die Tracht und den Habitus dahingehend verändern, dass sich die Kristalle kurz, gedrungen und deutlich größer ausbildeten. Die Kristallform kann damit kein eindeutiger Beweis für die Verwendung von Anhydrit als Ausgangsmaterial sein. Eher deuten die in [10] festgestellten ungelöschten Kalkreste und vereinzelt in Gipsmörteln auftretenden Calciumkarbonat- Modifikationen sowie noch nicht hydratisierter Anhydrit auf die Verwendung von mehrphasigen calciumsulfatischen Hochbrandprodukten hin.

In keiner der in [3, 8, 10] untersuchten Proben wurden Halbhydrat oder Subhydrate² gefunden. Einige Proben enthielten ferner Spuren (< 1 M.-%) von Tonmineralen, die auf eine Verunreinigung des Mörtelmaterials durch Bausteinstücke zurückgeführt werden können. Die weiterhin identifizierten Quarz- sowie Feldspatphasen (Mikrolin und Albit) waren aufgrund der Korngrößen und –formen ausnahmslos dem Zuschlag zuzurechnen. Ihr Anteil am Stoffbestand der untersuchten Proben lag generell unter 2 M.-%. Des weiteren konnte durch den makroskopischen Vergleich der eingesetzten Gesteinskörnungen mit den in der unmittelbaren Umgebung vorkommenden geologischen Formationen festgestellt werden, dass bei der Mörtelherstellung stets lokale Grundstoffe benutzt wurden. In gipsreichen Regionen, wie zum Beispiel in der Osterroder Gegend, wurden weitgehend reine Gipsmörtel verwendet. Dabei traten

² Hydrate mit weniger als 0,5H₂O

alle vorgenannten Minerale teils als Bestandteile der Matrix, teils als gezielt zugesetzte Gesteinskörnung auf.

Die in [3] untersuchten Proben aus dem norddeutschen und niederländischem Raum bestanden aus reinen Kalkmörteln, aus Kalk-Gips- und aus Gips-Kalk-Mörteln, wobei sich die untersuchten Gips-Kalk-Mörtel ausschließlich in sakralen Bauten, die eingesetzten Kalkmörtel dagegen sowohl in Profan- als auch in Sakralbauten befanden. Auch nach [3] war für die Wahl des Bindemittels in früherer Zeit neben den erzielbaren Mörtелеigenschaften hauptsächlich die Lage der Rohstoffvorkommen von Bedeutung, da lange Transportwege vermieden werden sollten. Als Zuschlag wurde in der Regel quarzitischer, z. T. marin gebildeter Sand bis etwa 4 mm maximaler Korngröße eingesetzt, da die Proben dem norddeutschen und niederländischen Küstenraum entstammten. Einige Mörtel enthielten zusätzlich geringe Mengen an Muschelschalen, die vermutlich neben ästhetischen Gesichtspunkten zur Erhöhung der Biegezugfestigkeit zugegeben worden sind. Untersuchungen zur Entwicklung eines Instandsetzungsmörtels in [3] konnten diese Vermutung bestätigen. Des weiteren wurde festgestellt, dass in Mörteln mit höherem Gipsanteil in der Regel weniger Gesteinskörnung enthalten war. Vereinzelt enthielten die Gips-Kalk-Mörtel nur so geringe Mengen an Gesteinskörnung, dass von einer Verunreinigung des Mörtels ausgegangen werden konnte.

In den in [10] untersuchten Proben wurden vereinzelt in Aminogruppen gebundene Stickstoffverbindungen gefunden, die wahrscheinlich als organische Verzögerer zugesetzt wurden. Auch in [27] wurden in vier von vierzig historischen Kalk- und Gipsmörtel der in [3] untersuchten Proben organische Zusätze in Form von Eiweißsubstanzen und Citronensäure nachgewiesen.

Da keine Aufzeichnungen über die Herstellungsverfahren historischer Gipsmörtel existieren, sind Aussagen über die damaligen Frischmörtелеigenschaften nach dem heutigen Wissensstand nicht möglich.

Die praktische Anwendung von Baustoffen ist vor allem von ihren physikalischen Kennwerten abhängig. Aus diesem Grund wurden in [10] die Rohdichte, die Porosität und die Porenradienverteilung, sowie die kapillare Wasseraufnahme bestimmt. Die Rohdichte aller untersuchten Proben lag zwischen 2,07- 2,37 g/cm³; die Porosität lag zwischen 11- 25 Vol.-%; und der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient (WAK) lag zwischen 0,15 und 10 [kg/m² * √h]. Bei den in [3] untersuchten Proben lag die

Porosität zwischen 25 bis 35 Vol.-%, wobei die Porosität der Mörtel mit steigendem Gipsgehalt abnahm.

Die Werte für den dynamischen Elastizitätsmodul (E-Modul) der in [10] untersuchten Proben streuten extrem zwischen 3,6 und 37,3 kN/mm², die Ergebnisse der Werte der Druckfestigkeit lagen zwischen 11 und 33 N/mm². Bei den in [3] untersuchten Proben lag die Druckfestigkeit der Mörtel mit hohem Gipsgehalt im Mittel bei 20 N/mm². Mit Abnahme des Gipsgehaltes verringerte sich auch die Druckfestigkeit. Deutlich geringere Druckfestigkeiten hatten die reinen historischen Kalkmörtel mit Werten im Mittel von 7 N/mm². Der E- Modul und die Druckfestigkeit der Proben in [8] korrelierten weitestgehend mit den vorgenannten Ergebnissen. So lag der E- Modul der historischen Gipsproben zwischen 9 und 24 kN/mm², die Biegezugfestigkeit lag zwischen 3 und 9 N/mm² und die Druckfestigkeit zwischen 5 und 26 N/mm².

Die Biegezug- und die Druckfestigkeit von Gipsmörteln hängen darüber hinaus von der Porosität und der Porenbeschaffenheit ab. Tendenziell weisen Gipsmörtel mit hoher Porosität und geringer Dichte geringere Festigkeiten auf, als Proben mit geringerer Porosität und höherer Dichte [3]. Auch zeigten Proben mit einer niedrigen Porosität (11 Vol.-%) einen geringeren Wasseraufnahmekoeffizienten (0,19 [kg/m²*√h]) [10].

Man geht heute davon aus, dass der Wechsel zwischen Mörteldurchfeuchtung und – trocknung aufgrund Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen einen entscheidenden Einfluss auf die Erhaltung und gegebenenfalls Verbesserung der Materialeigenschaften von Gipsmörteln hat. Durch feuchtebedingte Anlösung und anschließender sekundärer Neukristallisation kommt es danach zu einer zusätzlichen Verdichtung des Mörtelgefüges, da vorhandener Porenraum verschlossen wird [3, 10]. Nach diesem Modell findet eine stetige Materialumlagerung zwischen Matrix und Porenraum statt. Die in [3, 8, 10] gewonnenen Erkenntnisse deuten auf einen positiven Einfluss einer mäßigen periodischen Materialdurchfeuchtung auf die Festigkeit des Mörtelgefüges hin. Sekundäre Kristallneubildungen können die Menge an Kapillarporen verringern und die Mörtelfestigkeit durch die Einengung oder den weitgehenden Verschluss von größeren Porenräumen erhöhen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an historischen Gipsmörtelproben aus [3, 4, 8, 10, 11] lassen sich wie folgt zusammenfassen:

E- Modul:	3,6 – 37,3 kN/mm ²
Biegezugfestigkeit:	3 - 9 N/mm ²
Druckfestigkeit:	5 - 33 N/mm ²
Dichte:	2,07 – 2,37 g/cm ³
Gesamtporosität:	11 - 35 Vol.-%
Wasseraufnahmekoeffizient:	0,15 - 10 kg/m ² *√h

Das Bindemittel bestand nahezu monomineralisch aus Calciumsulfat-Dihydrat. Akzessorisch waren Carbonate und/oder Quarze und Feldspäte nachweisbar. Wobei Quarz und Feldspat aufgrund der Korngröße und Kornform ausnahmslos der Gesteinskörnung zuzuordnen waren.

2.3 Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat- Basis

Im folgenden wird auf die bisher in [3, 8] beschriebenen Instandsetzungsmörtel eingegangen. Die Ansätze basieren auf der Verwendung von calciumsulfat-gebundenen Ausgangsstoffen, um die Kompatibilität mit dem Altmaterial zu gewährleisten. Die Zusammensetzungen von möglichen Ausgangsmaterialien der Mörtel bieten eine große Kombinationsmöglichkeit. Anhydrit, α -HH und β -HH können in ihren Mischungsverhältnissen kombiniert werden, genau wie die Art und Menge an Zuschlägen. Auch die Zugabe abbinderegulierender, meist flüssiger Zusatzmittel wie Verzögerer, Beschleuniger und Anreger erweitern die Möglichkeiten, die Eigenschaften von abgebundenen Gipsproben zu beeinflussen.

Untersuchungen an historischen Mörteln ergaben, dass diese nahezu monomineralisch aus Calciumsulfat-Dihydrat bestehen (vergleiche hierzu Kapitel 2.2). Aufgrund der guten Verträglichkeit sollte der Gehalt an CaSO₄- Komponenten im Bindemittel möglichst hoch sein. Aus diesem Grund wurde in [3] angestrebt, einen Instandsetzungsmörtel mit einem Gehalt ≥ 70 M.-% an CaSO₄- Komponenten herzustellen.

Als Bindemittel kamen in [3] β -HH, α -HH, Rostbandabwurf³, Weißkalkhydrat⁴, Wasserkalkhydrat⁵, Portlandzement CEM I 35 NW-HS, Trassmehl als natürliches Puzzolan sowie Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Microsilica als künstliche Puzzolane zur Anwendung. Als Zuschlag wurde Kalksteinmehl und Quarzsand verwendet und die Zusatzmittel teilten sich nochmals in Abbindeverzögerer und Hydrophobierungsmittel⁶ auf. Als Abbindeverzögerer wurden Citronensäure, L(+)-Weinsäure und ein handelsüblicher Verzögerer mit der Bezeichnung Retardan P⁷ verwendet. Als Hydrophobierungsmittel kamen hier ein Calciumstearat und ein Calciumsilikonat zur Anwendung. Die Ausgangsmaterialien wurden untereinander kombiniert und Mischungen gegebenenfalls weiter eigenschaftsoptimiert. Alle in [3] untersuchten Mischungen, die den dort gestellten Anforderungen an Festigkeit, Verwitterungswiderstand und Porosität nicht erfüllten, wurden verworfen.

Da α -HH und β -HH eine sehr kurze Verarbeitbarkeitszeit (< 10 min) aufweisen, wurden in [3] Zusatzmittel mit einer verzögernden Wirkung verwendet. Dabei zeigte sich, dass sich die mechanischen Eigenschaften der Mörtel bereits durch geringe Zugaben deutlich beeinflussen lassen, und dass die Wahl der einzusetzenden Verzögerer abhängig von den erwünschten Eigenschaften zu treffen ist. So verändern sich bei Zugabe von Citronensäure und L(+)-Weinsäure Tracht und Habitus, Größe und Anzahl der Kristalle, was unmittelbar an den Eigenschaften, wie dem E-Modul und der Druckfestigkeit sowie der Porosität und dadurch bedingt an der Wasserlöslichkeit, erkennbar war. Mit dem Zusatz von Retardan P als Verzögerer für α -HH konnte neben einer Verlängerung der Ansteifungszeit, der Festigkeiten und des E-Moduls auch eine geringfügige Verringerung der Schwindneigung erreicht werden. Ziel des Einsatzes der Hydrophobierungsmittel war eine Verringerung der kapillaren Wasseraufnahme und somit ein erhöhter Widerstand gegen Schlagregen, so dass allgemein von einer erhöhten Wasserresistenz gesprochen werden konnte.

Einzig die Mörtel in der Kombination α -HH, β -HH und Wasserkalkhydrat (CL70) entsprachen weitgehend den gesamten gestellten Anforderungen. Eine weitere

³ Hochbrandgips mit überwiegend erbranntem Anhydrit II sowie β -Anhydrit III und nur geringen Mengen β -Halbhydrat

⁴ CL90, nach EN 459, dessen Erhärtung i. W. durch Bindung von Kohlendioxid erfolgt

⁵ schwach hydraulischer Kalk, nach EN 459; CL80, CL70

⁶ Substanzen, die in feinst verteilter Form in die Bindemittelmatrix eingebettet werden und dort wasserabweisend wirken

⁷ Formaldehydsulfonatkondensat

Optimierung erfolgte durch die Variation der Anteile dieser Bindemittelkomponenten und eine Magerung mit feinkörnigem Quarzsand und/oder Kalksteinmehl.

Das entscheidendste Kriterium der Wasserresistenz wurde durch Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten, des Austrocknungsverhaltens, des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel, sowie durch Lösungsversuche im fließendem Wasser und anhand des Witterungsverhaltens bei Außenlagerung beurteilt. Je geringer die Kapillarporosität der Mörtel war, desto kleiner war auch die Wasseraufnahme. Daraus ist zu schließen, dass auch die Wasserabgabe beim Trocknen langsamer abläuft. Dadurch ist die Zeitspanne für die Verdunstung der gipsgesättigten Lösung ausreichend groß, um relativ große Gipskristalle bilden zu können, die die Kapillarporen in der oberflächennahen Zone zusetzen können.

Mörtelmischungen mit der Bindemittelzusammensetzung α -HH / β -HH/ Wasserkalkhydrat im Mischungsverhältnis (20/50/30) + 0,1 M.-% Weinsäure bezogen auf den Halbhydratanteil hatte in der Summe aller Eigenschaften dem Anforderungsprofil in [3] entsprochen. Bei Zugabe von ≥ 20 M.-% Kalksteinmehl oder Mischungen aus Kalksteinmehl und Quarzsand konnte eine weitere Steigerung der Wasserresistenz bewirkt und die Verarbeitungseigenschaften verbessert werden.

Im Gegensatz zu [3] wurde in [8] der Schwerpunkt im Bereich des Bindemittels auf die Verwendung von Anhydrit gelegt. Somit kamen für das Bindemittel als Ausgangsstoff neben β -HH und α -HH auch ein Thermoanhydrit (REA-Anhydrit) sowie ein Naturanhydrit zur Anwendung. Im Gegensatz zu Naturanhydrit, der als Anhydrit II vorliegt, entstehen bei der Herstellung des REA-Anhydrit neben der Phase Anhydrit II auch noch geringe Mengen an Anhydrit III und Halbhydrat. Zusätzlich wurden als Bindemittel Zusätze aus Luftkalk CL 90 sowie CL 80, ein hydraulischer Kalk HL2, ein Weißzement und ein Portlandzement CEM III 42,5 R- HS eingesetzt. Weiterhin wurden Hüttensand und Microsilica als künstliche Puzzolane, als Zuschlag Anhydritstein, Gipsstein und Kalkstein verwendet. Als Zusatzmittel kamen organische Stoffe wie die L(+)- Weinsäure, Citronensäure, Eiweißstoffe wie Kollagen, Säurecasein, Lactalbumin und Trockenblut und als Anreger Kaliumsulfat und Calciumsulfat- Dihydrat zum Einsatz.

Durch den Zusatz von Kalk konnten die relativ hohen Festigkeiten der reinen Gipspasten gesenkt werden, die Wasserresistenz wurde schon bei geringer Zugabe von Kalkhydrat (5 M.-%) deutlich verbessert. Auffallend waren die hohen

Schwindwerte, die durch den Einsatz von Hüttensand gesenkt werden konnten. Reine Gips-Hüttensand-Mischungen waren allerdings nicht geeignet, da in diesem Fall eine Abnahme der Festigkeit im Vergleich zum reinen Anhydrit festgestellt wurde. Der Masseverlust nach Wasserlagerung wurde bei Zugabe von 20 M.-% Hüttensand um ca. 10 M.-% herabgesetzt, erst der Zusatz von Weißkalkhydrat (CL 90) verbesserte die Wasserresistenz. Die besten Ergebnisse zeigte eine Mischung aus Thermoanhydrit und α -HH unter Zugabe von Weißkalkhydrat. Die Zugabe von organischen Säuren/Salzen erhöhte ebenfalls die Wasserresistenz, jedoch nur in sehr geringem Maße und wurden aus diesem Grund nicht weiter verfolgt. Microsilica führte bei gleichzeitiger Zugabe von Kalk ebenfalls zu einer Verbesserung der Wasserresistenz, die Festigkeitseinbußen waren jedoch wesentlich größer als bei vergleichbaren Gips-Kalk-Mischungen. Diese Mischungen wurden somit auch verworfen. Die Zugabe von inerten Zusatzstoffen wie z.B. Kalksteinmehl verringerte das Schwinden und senkte die Festigkeiten der Gips-Kalk-Mörtel bei gleichbleibend hoher Wasserresistenz, bewirkte auf der anderen Seite aber eine gravierende Verschlechterung der Verarbeitungseigenschaften.

Einige Mörtel wiesen unter Zugabe von Weiß- und HS-Zement wie erwartet eine höhere Wasserresistenz auf. Wegen der möglichen Ettringitbildung bei Durchfeuchtung des ausgehärteten Mörtels und einer dadurch bedingten Treiberscheinung wurden diese Mörtel aber nicht empfohlen.

Die Verarbeitbarkeit solcher Mörtel kann durch den Einsatz von Zuschlag mit einer geeigneten Sieblinie verbessert werden [8]. Als Zuschlag wurden Anhydrit-, Gips- und Kalksteinbrechsand der gleichen Körnung eingesetzt. Von den untersuchten Baustoffen erschienen Kalksteinbrechsand und bedingt Anhydritbrechsand als geeignet für die Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel. Mörtel mit diesen Zuschlägen wiesen eine ausreichende Beständigkeit gegenüber lösendem Angriff (Lagerung in fließendem Wasser) auf. Die Zugabe von Anhydritbrechsand kann jedoch bei einer dauernden Feuchtelagerung zu Quellprozessen durch die nachträgliche Hydratation des Anhydrits führen. Bei lang andauernder Lagerung ist eine Schädigung des Gefüges nicht auszuschließen. Unabhängig von der Art des verwendeten Zuschlags wurde das Wasserrückhaltevermögen und das Standverhalten für den Einsatz als Mauermörtel durch den Kornaufbau verbessert.

Als beste Mischung wurden in [8] Rezepturen mit einem Bindemittelgemisch aus 80 M.-% Anhydrit (Thermoanhydrit oder Naturanhydrit), angeregt mit 0,6 M.-% Kaliumsulfat oder 1 M.-% Gips bezogen auf den Anhydritgehalt, und 20 M.-% Kalk (Luftkalk oder hydraulischer Kalk) angegeben. Als Zuschlag wird Kalksteinbrechsand mit einem Bindemittel/Zuschlag- Verhältnis 1:1 oder 1:2 empfohlen. Mischungen mit Naturanhydrit zeigten jedoch im Vergleich zu solchen mit Thermoanhydrit bei Einwirkung von Feuchte ein erhöhtes Quellen. Zu bemerken ist, dass die Farbe der Mörtel von den verwendeten Ausgangsstoffen beeinflusst wird. So wird die Farbe des Thermoanhydrit mit leicht rosa, die des Kalkes CL 80 mit beigefarben und die des hydraulischen Kalkes HL2 mit grau- braun angegeben. Da aber die historischen Mörtel überwiegend hell bis weiß sind, sind in den meisten Fällen die farbigen Ausgangsmaterialien für Sanierungsmörtel unbrauchbar. Damit bleiben als Ausgangsmaterialien Naturanhydrit und der Luftkalk CL 90 mit weißer Farbe übrig.

Des weiteren ist unter der Nummer DE 197 04 066 C 2 ein Patent angemeldet [39], das sich mit der Verwendung einer Trockenmischung zur Herstellung eines altmaterialverträglichen Mörtels auf Basis von Calciumsulfat befasst. Als Bindemittel ist hier Anhydrit angegeben, der mit zwei Varianten von Gesteinskörnungen versetzt werden kann. Dies sind Gipsbrechsand/Anhydritbrechsand und bis zu 60 M.-% Quarzsand.

Fasst man die Mörtelkonzepte aus [3, 8] zusammen, so kann man zwei Mischungen angeben, die in Bezug auf die geforderten Eigenschaften (Verwitterungsresistenz, angepasste Festigkeiten und Gesamtporosität) das beste Ergebnis aufwiesen.

Bei Verwendung von Halbhydrat als Ausgangsmaterial war dies:

α -HH / β -HH / Wasserkalkhydrat im Verhältnis 20/50/30 [M.-%]

Dabei wurde die Mischung mit 0,1 M.-% Weinsäure bezogen auf den Halbhydratanteil verzögert.

Wird Anhydrit als Ausgangsmaterial gewählt, so wird in [8] folgende Mischungszusammensetzung empfohlen:

Anhydrit / Kalkhydrat im Verhältnis 80/20 [M.-%]

Diese Mischung wurde mit 0,6 M.-% K_2SO_4 oder 1 M.-% Gips bezogen auf den Anhydritanteil angeregt. Des Weiteren wurde als Gesteinskörnung Kalksteinbrechsand im Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis 1:1 oder 1:2 empfohlen.

2.4 Historisches gipshaltiges Mauerwerk

Mauermörtel haben die Aufgabe, einen homogenen Verbund zwischen den Mauersteinen herzustellen. Die Standsicherheit und die Lebensdauer wird zum Einen durch die statische oder dynamische mechanische Belastung beeinflusst. Zum Anderen spielt die Verwitterungsresistenz eine Rolle. Der Verbund zwischen Mörtel und Mauersteinen ist von mehreren Faktoren abhängig, wie der Form, dem Aufbau und der Oberflächenbeschaffenheit der Steine. Eckige und/oder unregelmäßig gebrochene Steine werden besser eingebunden als runde. Poröse Oberflächen zeigen einen besseren Verbund mit dem Mörtel als dichte Oberflächen, sofern nicht das zur Erhärtung notwendige Wasser aus dem Mörtel abgesaugt wird.

Physikalische Eigenschaften der verbauten Materialien haben einen direkten Einfluss auf die Verbundwirkung und den Erhaltungszustand des Mörtels und des Steines. Diese Eigenschaften sind z. B. die Festigkeiten, der E-Modul, die Temperaturdehnung und das Quell- bzw. Schwindverhalten. Die Festigkeiten und die E-Moduli der Mörtel müssen in der Regel geringer als die der Steine sein, um Zwangsspannungen zu verhindern, die zu Rissen führen können. Diese Risse ermöglichen das Eindringen von Feuchtigkeit in das Mauerwerk, was aufgrund von Frostschäden und Ausblühungen zu Abplatzungen und zu Gefügeschäden führen kann. Feuchtigkeit ist eine der häufigsten Ursachen für Bauschäden, da durch Wasser viele chemische, physikalische und biologische Prozesse erst ermöglicht werden [52, 53, 54]. So sind ca. 50% aller auftretenden Bauschäden auf Feuchteeinwirkungen zurückzuführen [54].

Ein wesentliches Schadenspotential bilden Ausblühungen und Krusten. Vor allem mineralische Stoffe, wie lösliche Salze, die in Form von Eigensalzen primär im Baustoff enthalten sein können sowie durch Unverträglichkeitsreaktionen historischer Baustoffe mit modernen Instandsetzungsmaterialien in den Werkstoff eingetragen bzw. dort entstehen können, sind für eine gefügezerstörende Wirkung verantwortlich [16].

Ein wichtiges Kriterium bei der Entstehung von Ausblühungen und Treibmineralen ist die Feuchtigkeit im Mauerwerk und die Löslichkeit der für die Schadensentstehungen verantwortlichen Salze. Eine hohe Porosität und eine hohe Feuchtigkeit begünstigt den kapillaren Lösungstransport innerhalb der Baustoffe. Verdunstet die Feuchtigkeit, so kristallisieren die Salzminerale aufgrund einer Übersättigung der

Lösung an der Oberfläche aus. Die Schädigung kann in einem Substanzverlust oder auch durch Ausblühungen bestehen, die wiederum bei ihrer Auskristallisation einen treibenden Einfluss auf das Mörtelgefüge haben können, oder eine negative ästhetische Wirkung durch ihre Farbgebung hervorrufen. Oberflächen mit Ausblühungen sind meistens an vor Niederschlagsbefeuchtung geschützten Stellen zu finden. Dauernd beregnete Flächen zeigen weitgehend keine Ausblühungen, sondern verstärkte Anlösungserscheinungen [10, 17].

Die folgenden Salzminerale können auf den Oberflächen historischer Gipsmörtel vorkommen. Sie wurden von [10] durch Untersuchungen an historischen Proben nachgewiesen:

Sulfatminerale

Thenardit	Na_2SO_4
Mirabillit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Hexahydrat	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Glaserit	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$

Nitratminerale

Nitrokalit	KNO_3
Nitronatrium	NaNO_3

Karbonatminerale

Calcit	CaCO_3
--------	-----------------

Chloridminerale

Halit	NaCl
Sylvin	KCl

Die in diesen Salzmineralen vorkommenden Ca^{2+} - und SO_4^{2-} -Ionen entstammen in erster Linie den An- und Auflösungen von Gipskristallen des Mörtelgefüges. Die Herkunft der Elemente Natrium, Kalium und Magnesium können verschiedener Art sein. Es besteht die Möglichkeit des primären Vorkommens in den Mörteln durch Gehalte löslicher Bindemittelkomponenten. Dieser Gehalt ist aber in den bisher untersuchten historischen Mörteln so gering, dass von dieser Seite aus keine bzw. geringe Schädigungen zu erwarten sind. Die Möglichkeit, dass die Elemente Natrium, Kalium und Magnesium in modernen Instandsetzungsmörteln vorkommen ist durchaus gegeben, da diese häufig aus mergeligem Kalk oder auch mit Zement hergestellt werden.

Folgende Schädigungsmechanismen können dabei in Verbindung mit den oben genannten Salzen in den Baustoffen auftreten. Ein treibender Angriff aufgrund Kristallisations- oder Hydratationsdruck, ein lösender Angriff sowie Schäden in Verbindung mit Frost. Kristallisationsschäden gehen mit einer Volumenvergrößerung beim Kristallisationsvorgang einher, wobei sich dies im Kristallisationsdruck bzw. linearem Wachstumsdruck äußert. Als Beispiel sei die Umwandlung von Thenardit (Na_2SO_4) in Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$) genannt, das mit einer Volumenzunahme von 320% einhergeht [18]. Unter dem Hydratationsdruck wird der Druck verstanden, der bei einem Feuchtezutritt entsteht, wenn eine wasserarme bzw. wasserfreie Bindemittelphase in eine wasserreichere Phase mit größerem Volumen übergeht. Die Wassermoleküle können dabei als molekular gebundenes Wasser wie bei Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$) oder als konstitutionell gebundenes Wasser wie bei Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) vorliegen [19]. Die Hydratation ist reversibel, d. h. bei Überschreiten bzw. Unterschreiten einer bestimmten Hydratationstemperatur findet eine Wasseranlagerung oder –abgabe statt. Besonders bauwerksschädigend sind daher Salze, deren Hydratationstemperatur im Bereich jahreszeitlicher Temperaturschwankungen liegt [18]. Die aus der Bildung voluminöser Produkte resultierenden Druckspannungen verursachen Quellen, Rissbildung, Festigkeitsverlust und daraus resultierende Abplatzungen und Zerstörungen des Gefüges.

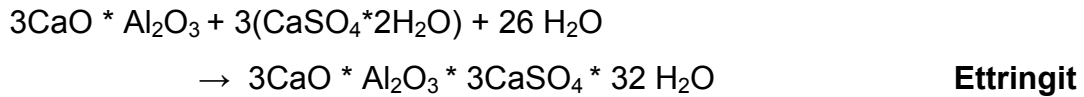
Als extrem gefügeschädigend gelten im Zusammenhang mit Gipsbaustoffen die Phasen Ettringit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$) und Thaumasit ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15 \text{ H}_2\text{O}$), deren Entstehung auf die Reaktion von Ca^{2+} -, Al^{3+} - und Si^{4+} -Kationen mit OH^- -, CO_3^{2-} - und SO_4^{2-} -Anionen in Anwesenheit von Wasser zurückzuführen ist [18]. Zerstörend ist gerade in diesem Fall ein innerer Sulfatangriff, da aus den Kontaktflächen historischer Gipsmörtel mit C_3A -⁸ oder Al_2O_3 -haltigen Instandsetzungsmörteln das Sulfat in wässriger Lösung immer in ausreichender Menge vorhanden ist.

Ettringit⁹ ist ein säulenförmiges, hexagonal- prismatisch kristallisierendes Mineral. Über Bildungsmechanismen von Ettringit existieren zwei Theorien, und zwar die Kristallwachstums- und die Quelltheorie [20]. Die Kristallwachstumstheorie geht davon aus, dass die Treibreaktion durch das Aufwachsen von Ettringitkristallen auf

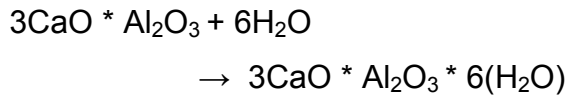
⁸ Tricalciumaluminat

⁹ Tricalciumaluminat- Trisulfathydrat

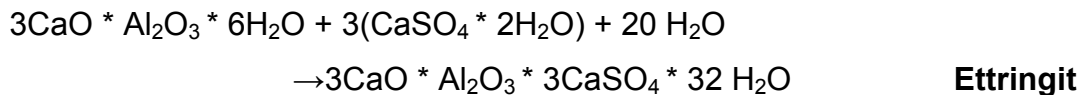
den Oberflächen von treibfähigen Bestandteilen wie dem C_3A entsteht. Voraussetzung sind das Vorhandensein von Sulfaten, Calciumhydroxid und Wasser neben C_3A , so dass folgende Reaktion ablaufen kann:



Die Quelltheorie besagt, dass infolge Hydratation zunächst Tricalciumaluminathydrat nach der Gleichung:



entsteht. Dieses Tricalciumaluminathydrat lagert Calciumsulfat- Dihydrat an, wodurch Ettringit nach folgender Gleichung entsteht:



Durch eine CO_2 - und SiO_2 - Zufuhr entsteht aus dem zuvor gebildeten Trisulfat Calciumsilicatcarbonatsulfathydrat mit dem Mineralnamen Thaumasit [19]. Die zugehörige Summenformel ist:



Durch die Volumenzunahme bei der Bildung von Ettringit kommt es zu Rissbildungen und Abplatzungen. Thaumasit nimmt nur ca. 45% des Volumens von Ettringit ein und bewirkt dadurch im Vergleich zum Ettringit eine geringere Dehnung. Es wird aber durch die Umwandlung von Ettringit in Thaumasit ständig Al_2O_3 für eine erneute Ettringitbildung freigesetzt und aus diesem Grund wird eine immer weiterführende Zerstörung hervorgerufen. Die SiO_2 -Zufuhr erfolgt aus den C-S-H-Phasen zementhaltiger Instandsetzungsmörtel und führt dort zu einer Verringerung der

Druckfestigkeiten [19]. Auf Thaumasit im Zusammenhang mit calciumsulfat-gebundenen Baustoffen wird detailliert im Folgenden eingegangen.

Wissensstand über Thaumasitbildung

Thaumasit (siehe Bild 7) ist ein in der Natur sehr selten vorkommendes Mineral. Aufgrund seines hohen Silikatgehaltes wird Thaumasit einerseits als Silikat klassifiziert, andererseits aber auch als Carbonat. Thaumasit kann zur Ettringitgruppe gezählt werden. Da Thaumasit sowohl optisch als auch röntgenographisch sehr dem Ettringit ähnelt, wurde er in technischen Produkten erst 1965 entdeckt [21].

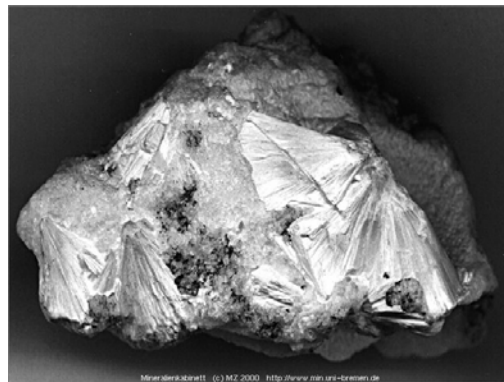


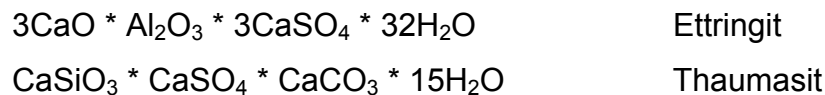
Bild 7: Thaumasit [72]

Gemäß seiner chemischen Zusammensetzung besteht Thaumasit massenanteilmäßig aus 27,00 M.-% CaO, 7,07 M.-% CO₂, 12,86 M.-% SO₃, 9,66 M.-% SiO₂ und 43,40 M.-% H₂O [21]. Somit ist Thaumasit sehr wasserhaltig, was zu einer niedrigen Dichte von 1,9 g/cm³ führt. Optisch erscheint Thaumasit transparent und ist von glasigem bis seidenweißem Glanz.

Thaumasit bildet ähnlich wie Ettringit nadelige, prismatische, hexagonale Kristalle. Seine Grundstruktur besteht nicht, wie bei Silikaten üblich, aus SiO₄-Tetraedern, sondern aus SiO₆-Oktaedern [21]. Thaumasit ist neben einem Magnesiumsilikat (MgSi₂H₂O₆) das einzig bekannte Mineral, das unter atmosphärischen Temperatur- und Druckbedingungen stabil ist [22]. Er beginnt ab einer Temperatur von 380 K (= 106,85°C) zu dehydatisieren [22] und zerfällt unter Bildung von Thaumasitglas [21].

Er ist damit thermisch stabiler als Ettringit, der sich bereits ab Temperaturen von 90°C in Monosulfat umwandelt [23].

Dass Thaumasit in seinen Eigenschaften sehr stark dem Ettringit ähnelt, zeigt sich im ähnlichen Kristallgitteraufbau. Lediglich die Si^{4+} -Ionen und die CO_3^{2-} -Ionen sind beim Ettringit durch Al^{3+} , bzw. SO_4^{2-} -Ionen ersetzt. Deutlich wird dies durch einen Vergleich der Summenformeln:



Im Gegensatz zu Ettringit enthält Thaumasit kein Aluminium aber zusätzlich Silizium und Carbonat im Kristallgitter [24].

Bevorzugt bildet sich Thaumasit bei Temperaturen von 0°C bis 15°C und sehr hoher Feuchtigkeit [21], da bei sinkender Temperatur die Neigung des Siliziums zur oktaedrischen Koordination steigt [75]. Dabei ist Thaumasit bei 5°C hundertfach weniger löslich als bei 20°C. Des weiteren wird berichtet, dass die Reaktion zu Thaumasit hauptsächlich bei pH-Werten von über 10,5 stattfindet [21].

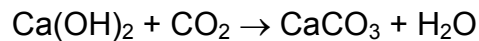
In einer Stellungnahme des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton [24] für Thaumasiterscheinungen in Beton heißt es dazu, dass nach derzeitigem Erkenntnisstand eine Thaumasitbildung nur unter folgenden Randbedingungen möglich ist:

- Feuchteeinwirkung
- überwiegend niedrige Temperaturen ($t < 15^\circ \text{C}$)
- carbonathaltige Zusätze (z.B. Kalksteinmehl, Kalksteinzuschlag etc.)

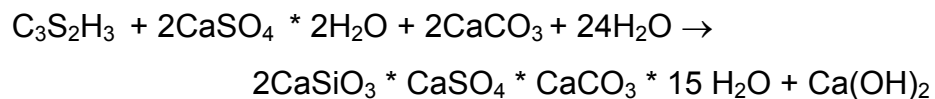
Gegenwärtig existieren zwei anerkannte Bildungshypothesen, welche die Entstehung von Thaumasit in Zementstein oder in kalk- oder zementhaltigen Produkten erklären. Sie werden dargestellt durch zwei Reaktionen, die jeweils bei Temperaturen unter 15°C ablaufen:

1. *Der direkte C-S-H-Weg*

Festigkeitsbildende C-S-H-Phasen des Zementsteins, die bei der Hydratation von Zement oder hydraulischem Kalk neben Calciumhydroxid (Portlandit - $\text{Ca}(\text{OH})_2$) als Reaktionsprodukt entstehen, werden bei dieser Reaktion unmittelbar mit Carbonat (CO_3^{2-}) und Sulfationen (SO_4^{2-}) in Gegenwart von Calciumionen (Ca^{2+}) und Wasser umgesetzt. Es wird angenommen, dass die Reaktion erst durch den direkten Abbau des Siliziumoxids (SiO_2) aus den C-S-H-Phasen und dem Einbau von Calciumcarbonat (CaCO_3) abläuft. Calciumcarbonat entsteht dabei durch die Reaktion von Calciumhydroxid mit Kohlenstoffdioxid:



Calciumcarbonat kann allerdings auch aus Zuschlagstoffen sowie aus einem verwendeten Zement mit carbonatischen Bestandteilen stammen. Durch die weitere Reaktion mit Sulfationen bzw. Calciumsulfat (CaSO_4) kommt es schließlich nach [75] zur Thaumasitbildung:

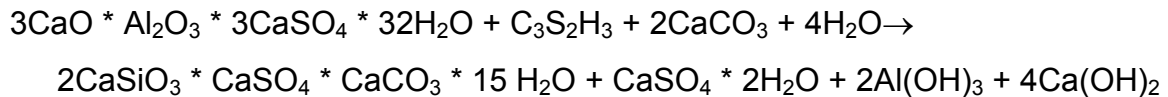


2. *Der Woodforditweg*

Die zweite Hypothese stützt sich auf die sog. Woodforditreaktion. „Woodfordit“ ist ein nach seinem Entdecker benannter Mischkristall, dessen Endglieder Ettringit und Thaumasit sind. Über die Existenz solcher Mischkristalle zwischen Thaumasit und Ettringit ist man sich jedoch bis heute in der Literatur nicht einig, da beide reinen Phasen (Ettringit, Thaumasit) als getrennte Endglieder existieren können und Aufwachsungen übereinander bilden können. Untersuchungen von Thaumasitaufwachsungen auf Ettringit in natürlichen Funden zeigen jedoch, dass es sich teilweise um solche Mischkristalle handelt [21].

Durch einen Sulfatangriff auf Zementstein bildet sich zuerst - wie oben beschrieben - Ettringit. Bei der Woodforditreaktion wird dieser zunächst in Si-Ettringit umgewandelt. Im weiteren Verlauf der Reaktion erfolgt beim Si-Ettringit

ein Austausch der Calciumaluminat gegen Calciumsilikate aus den C-S-H-Phasen und es findet ebenfalls ein Einbau von Calciumcarbonat statt. Dieses ist entweder bereits in Form von carbonathaltigen Zuschlägen vorhanden, oder es entsteht durch Karbonatisierung von Calciumhydroxid. Durch diesen Austausch entsteht Thaumasit nach [75]:



Beide oben beschriebenen Bildungshypothesen basieren auf der Annahme, dass Zement vorhanden ist. Wird jedoch Kalk als Bindemittel eingesetzt, so ist die Entwicklung von C-S-H-Phasen abhängig von der Zusammensetzung des Kalks. Weißkalke bestehen überwiegend aus Calciumhydroxid (Portlandit), Calcit und Calciumoxid. Abhängig von ihrer Einstufung nach EN 459 (CL90, CL80, CL70) können Weißkalke bis zu 30 M.-% hydraulische Komponenten (C_3S , C_2S , C_3A , $\text{C}_2(\text{AF})$) enthalten und sind damit in der Lage, in mehr oder weniger großen Mengen C-S-H-Phasen zu bilden.

Hydraulische Kalke besitzen gegenüber Weißkalken einen wesentlich höheren Anteil an hydraulischen Komponenten. Sie weisen teilweise Zementbestandteile von über 50 M.-% auf. Es entstehen somit neben Calciumcarbonat auch verhältnismäßig große Mengen an C-S-H-Phasen. Daher ist auch für Kalk die Voraussetzung gegeben, die oben beschriebenen Hypothesen zu erfüllen, und damit in Gegenwart von Sulfat - über den C-S-H-Weg oder über den Woodforditweg - Thaumasit zu bilden.

Kommt es zur Thaumasitbildung infolge eines Sulfatangriffs von außen, so wird dies allgemein als TSA (Thaumasite Form of Sulfat Attack) bezeichnet. Die Bildung von Thaumasit führt im Unterschied zur Ettringitbildung nicht zu einer treibenden Reaktion, sondern zu einer Auflösung des Baustoffgefüges, so dass sich fester Beton oder Mörtel in eine breiige Masse ohne Bindevermögen umwandelt [24].

In Betonen, die aufgrund von Sulfatangriff zerstört wurden, wurde Thaumasit erstmals 1965 nachgewiesen. Vor allem in England sind in den letzten Jahren Schäden bei Betonbauwerken aufgetreten, die einem Angriff durch stark sulfathaltige

Böden und Wässer ausgesetzt waren. Es wird berichtet, dass TSA in über 80 Gebäuden in England gefunden wurde, und dass die Anzahl der Vorfälle von TSA in anderen Ländern unter kalten und feuchten Bedingungen zunimmt [25]. Dabei zeigten sich die Schäden in Treiberscheinungen infolge Sekundärettringit und Sekundärgips und in Entfestigungen infolge TSA [24]. Darüber hinaus konnte man Thaumasit auch in Kalk-Gips-Mörteln bzw. Putzen sowie bei Untersuchungen in geschädigten Mauerwerksbereichen und an mittelalterlichen Kirchenbauten identifizieren. Die Schäden traten in Form von sichtbaren Mauerwerksausbrüchen bzw. Treibkernen auf [21].

Die Tatsache, dass Thaumasit in Kalk-Gips-Mörteln nachgewiesen wurde, bestätigte die Annahme, dass unter bestimmten klimatischen Bedingungen eine Thaumasitbildung bei Instandsetzungsmörteln nicht auszuschließen war. Es handelte sich um Gips-Kalk-Mörtel, die aufgrund des verwendeten Kalkhydrates hydraulische Komponenten enthielten. Eine eingehende Untersuchung bezüglich des Thaumasitbildungspotentials der entwickelten Instandsetzungsmörtel erschien folglich unumgänglich.

Zur Einteilung und Klassifizierung der hydraulischen Komponenten von Kalken kann die Boynton Gleichung [44] herangezogen werden, in der der sog. „Cementation Index“ (CI) definiert wird durch:

$$CI = \frac{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + 1,4 \text{ MgO}} \quad \text{Gl. 1}$$

Damit ließ sich das Verhältnis der hydraulischen (Zähler) und nichthydraulischen (Nenner) Komponenten in den verwendeten Kalken ausdrücken. Diese konnten dann miteinander verglichen werden.

2.5 Transportmechanismen von Feuchtigkeit im Mörtel

Durch die sich stets verändernden Feuchte- und Temperatureinwirkungen sind Mauerwerksbauteile im Oberflächenbereich generell hohen Wechselbeanspruchungen unterworfen [34]. Aus diesem Grund ist es von Bedeutung, sich die Transportmechanismen von Feuchtigkeit im Mörtel genauer zu betrachten.

Die Tatsache, dass die Ladungen im dipolaren Wassermolekül ungleich verteilt sind, ist für das physikalische und chemische Verhalten von Wasser von großer Bedeutung. Das physikalische Verhalten von Wasser zeigt einige Anomalien wie die große spezifische Wärmekapazität, die großen Werte der Verdunstungs- bzw. Kondensationswärme und die große Oberflächenspannung. Zum Verdampfen wird mehr Energie verbraucht als zum Erwärmen. Dadurch werden Temperaturänderungen stark verzögert, was auch für das Durchfeuchtungs- und Trocknungsverhalten von Baustoffen von Bedeutung ist [55].

Relative Luftfeuchte	Wassergehalt	Wassergehaltsbereich	Speichermechanismus	Vorherrschender Transportmechanismus
$\varphi = 1$	u_{\max}	Übersättigungsbereich	-	Wasserströmung
$\varphi = 1$	u_F			
$\varphi = 0,95$	u_{95}	Kapillarbereich	Kapillarkondensation	Ungesättigte Porenwasserströmung
$\varphi = 0$	$u=0$	Sorptionsbereich	Adsorption	Wasserdampfdiffusion

Bild 8: Einteilung der Wassergehaltsbereiche nach [55]

Die in einem Baustoff enthaltene Menge an Feuchte wird üblicherweise als massebezogener Wassergehalt oder als volumenbezogener Wassergehalt angegeben. Man unterscheidet drei Bereiche (siehe Bild 8): den Bereich niedriger Feuchte, den hygroscopischen Bereich, in dem Diffusionsvorgänge den Feuchtetransport und Adsorptionsvorgänge die Wasserspeicherung bestimmen sowie den überhygroscopischen Bereich höherer Feuchte, in dem der Wassertransport durch ungesättigte Porenwasserströmung bestimmt wird und die Oberflächenspannung des Wassers und der dadurch bedingte Kapillardruck den

Transportmechanismus entscheidend beeinflussen. Das Wasser wird gespeichert, indem die Porenbereiche beginnend bei den Gelporen mit Wasser gefüllt werden.

Betrachtet man nun die Transportmechanismen von Feuchte, so können sie nach [56] verschiedenen Aggregatzuständen über die sogenannte Knudsen-Zahl Kn zugeordnet werden.

$$Kn = \frac{\lambda}{2r} \quad \text{Gl.2}$$

mit

λ = mittlere freie Weglänge des Wassermoleküls

$2r$ = doppelter äquivalenter Porenradius

Es ergibt sich der Kontinuumsbereich ($Kn \ll 1$), der Übergangsbereich (Kn ungefähr 1) und der Molekularbereich ($Kn > 1$). Meist liegt ein breit gefächertes Porengrößenspektrum vor, das alle Bereiche überdeckt; die Transporteffekte überlagern sich. Einen Überblick über diese Zuordnung liefert Bild 9.

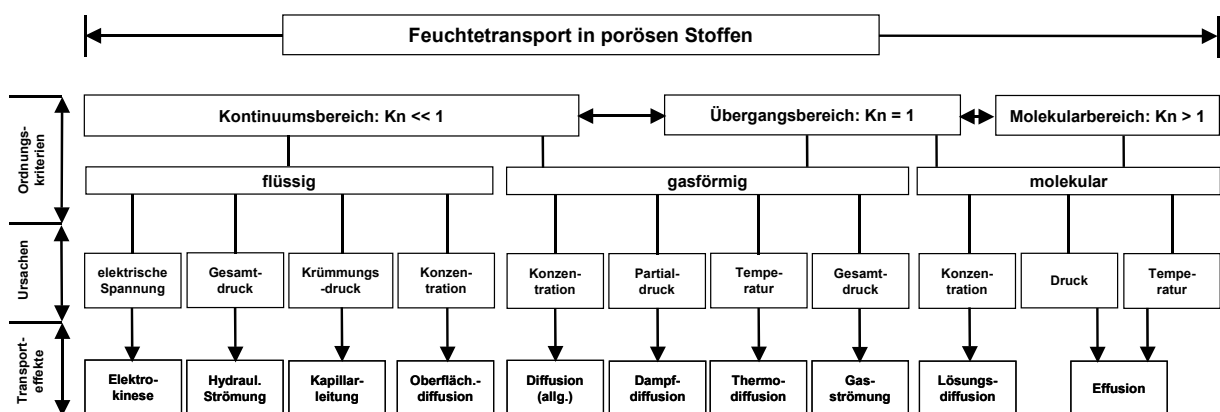


Bild 9: Feuchtetransport in porösen Baustoffen – Übersicht [56]

Für die Untersuchung von Witterungseinflüssen auf Mauermörtel sind die Diffusion und der kapillare Wassertransport die wesentlichen Transportmechanismen.

Die Diffusion ist der im hygroscopischen Bereich vorherrschende Transportvorgang. Sie entsteht, wenn einzelne Teilchen durch ihre thermische Eigenbeweglichkeit, die

sogenannte Brown'sche Molekularbewegung, zu wandern beginnen. Bei unterschiedlicher Teilchenkonzentration tritt ein gerichteter Massestrom der Teilchen in Richtung der geringeren Konzentration auf, um den Konzentrationsunterschied auszugleichen.

Die Diffusion von Wasser in Bauteilen tritt hauptsächlich in relativ trockenen Baustoffen auf, wo die Kapillarleitung noch nicht von Bedeutung ist und keine Strömung aufgrund von Konzentrationsunterschieden auftritt. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen der Wasserdampfdiffusion und der Lösungsdiffusion. Des Weiteren gibt es noch die Oberflächendiffusion und die Effusion [55, 57, 58].

Bauphysikalisch sind folgende Kenngrößen von Bedeutung:

Diffusionskoeffizient D_D :

Die Grundgleichung aller Diffusionsvorgänge wurde von Fick im sogenannten 1. Fick'schen Gesetz formuliert und beschreibt den Massestrom durch Diffusion aufgrund eines Konzentrationsgefälles.

$$m = - D_D * \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad \text{Gl. 3}$$

Der Quotient auf der rechten Seite beschreibt dabei das Konzentrationsgefälle, während die Größe D als Diffusionskoeffizient bezeichnet wird. Je höhere Werte D annimmt, umso größer ist der Massenstrom durch das Bauteil. Der Diffusionskoeffizient lässt sich nach DIN EN ISO 12572 praktisch auch über die Temperatur in Kelvin und den Luftdruck in Pascal berechnen (siehe Gl. 4), wobei für $T_0 = 273 \text{ K}$ und für $P_0 = 101325 \text{ Pa}$ angesetzt wird. Für poröse Festkörper liegen die Diffusionskoeffizienten im Bereich von 10 bis $10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ [55].

$$D_D = 0,083 * \frac{P_0}{P} * \left[\frac{T}{T_0} \right]^{1,81} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad \text{Gl. 4}$$

Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d :

Die äquivalente Luftschichtdicke ist das Produkt $\mu \cdot s$ aus der Diffusionswiderstandszahl und der Dicke eines Bauteils und liefert eine Angabe darüber, wie dick eine Luftschicht sein müsste, damit sie den gleichen Diffusionswiderstand hätte wie der betrachtete Baustoff [54]. Eine genaue Beschreibung sowie Zahlenwerte des s_d -Wertes für einzelne Bauprodukte finden sich in DIN EN 12524.

Die kapillare Strömung von Wasser, die im überhygroskopischen Bereich in ungesättigten Poren auftritt, ist von allen Wassertransportarten die für die hygrischen Eigenschaften von Mauerwerksmörteln bedeutsamste.

Die Kapillarleitung hängt stark mit der Oberflächenspannung von Wasser zusammen. Durch Kapillarsaugen kommt es in engen Röhren zur Ausbildung von Menisken an den Rändern der Wasserfläche sowie zu Depressions- und Aszensionserscheinungen. Ursache ist die Grenzflächenspannung, also die an der Grenzfläche zwischen zwei Stoffen auftretende Kraft pro Länge. Die Oberflächenspannung von Wasser ist die Grenzflächenspannung zwischen der Oberfläche des Wassers und der es umgebenden Luft.

Bei einer gekrümmten Grenzfläche tritt ein Druck senkrecht zu dieser auf. Dieser sogenannte Kapillardruck P_k ist abhängig vom Krümmungsradius R und der auftretenden Grenzflächenspannung σ und ist im ersten Laplace'schen Satz festgeschrieben. Mit kleiner werdendem Krümmungsradius, also bei steigender Krümmung, steigt auch der Kapillardruck. Er ist dann positiv definiert, wenn Zugspannungen auftreten, also wenn er Unterdruck erzeugt und die Grenzfläche aus Sicht des gespannten Stoffes konkav erscheint.

Treffen nun ein Festkörper, eine Flüssigkeit und ein Gas an einer Grenzfläche zusammen, wie es bei Wassereindringen in eine ungesättigte Baustoffpore der Fall ist, so formulieren sich die Gleichgewichtsbedingungen allein über die auftretenden Grenzspannungen σ_{ij} zwischen den Stoffen und den Grenzwinkel θ .

Daher ist der sich einstellende Grenzwinkel auch nur abhängig von den aneinandergrenzenden Stoffen und völlig unabhängig von den gegebenen geometrischen Randbedingungen. Dies ist der zweite Laplace'sche Satz. Je nach Grenzwinkel θ ergibt sich eine unterschiedliche Benetzbarkeit des Festkörpers.

$\theta = 0$	vollständig benetzbar
$0 < \theta < 90^\circ$	unvollständig benetzbar
$90^\circ < \theta < 180^\circ$	nicht benetzbar

Bei direktem Kontakt mit Wasser nehmen Baustoffe dieses kapillar auf. Nach [54] gibt es dabei zwei wichtige Zusammenhänge:

Zum einen kann vereinfachend davon ausgegangen werden, dass die anfängliche Geschwindigkeit des kapillaren Saugvorgangs direkt vom Radius der Kapillaren abhängt. Folgende Gleichung beschreibt diesen Zusammenhang:

$$V = K * r \quad \text{Gl.5}$$

mit

$$K = \frac{r^2}{8\mu\chi} * \left[\frac{2\sigma}{r} - g * \rho * \chi \right] \quad \text{Gl. 6}$$

dabei ist

r = Kapillarradius [m]

x = Steighöhe des Wassers [m]

η = Viskosität des Wassers [(N * s)/m²] (ca. 10⁻³ (N * s)/m²)

σ = Oberflächenspannung des Wassers [N/m] (ca. 72 * 10⁻³ N/m)

ρ = spezifisches Gewicht des Wassers [kg/m³]

g = Erdbeschleunigung (ca. 10 m/s²)

Die anfängliche Sauggeschwindigkeit ist somit also in grobkapillaren Baustoffen größer als in feinkapillaren. Als Grenzwert gelten dabei Kapillarporen mit einem Radius von $r \leq 4$ nm. Ab diesem Wert ist die Leistungsfähigkeit des kapillaren Saugens so gering, dass die ihr entgegenwirkende Verdunstung den Saugeffekt völlig aufhebt.

Zum anderen ist die maximal mögliche Steighöhe des Wassers in der Kapillare umgekehrt proportional zum Porenradius, so dass sich bei besonders feinen Kapillaren die höchsten Steighöhen ergeben. Folgendes Gesetz beschreibt diesen Zusammenhang:

$$H_{\max} = \frac{2\sigma * \cos \theta}{r * \rho * g} \quad \text{Gl. 7}$$

mit

H = Steighöhe des Wassers [m]

σ = Oberflächenspannung des Wassers [N/m] (ca. $72 * 10^{-3}$ N/m)

θ = Benetzungswinkel zwischen Flüssigkeitsspiegel und Kapillarwand

r = Kapillarradius [m]

ρ = spezifisches Gewicht des Wassers [kg/m³]

g = Erdbeschleunigung (ca. 10 m/s²)

Aus diesen beiden Gesetzmäßigkeiten heraus stellt sich in der Praxis ein Gleichgewichtszustand bezüglich der Durchfeuchtungshöhe ein. Neben der oben beschriebenen Untergrenze für die Porenradien, bei der das kapillare Saugen aufgrund der geringen Sauggeschwindigkeit zum Erliegen kommt, gibt es auch eine Obergrenze der Porenradien, bei der keine nennenswerte Steighöhe mehr erreicht wird. Diese liegt im Bereich von $r = 100 \mu\text{m}$, was einer Steighöhe H_{\max} von 0,15 m entspricht [54].

Da in der Baupraxis Phasen der Befeuchtung mit Trocknungsphasen abwechseln, müssen auch diese betrachtet werden. Diese werden im Wesentlichen von zwei Vorgängen bestimmt. Dem Feuchtigkeitsübergang auf der Bauteiloberfläche und dem Feuchtetransport aus dem Inneren. Mit u_0 bezeichnet man den Feuchtegehalt des Baustoffs zu Beginn des Trocknungsvorgangs. Die Austrocknung lässt sich über die Differenz zwischen der mittleren Feuchte u_M und der Ausgleichsfeuchte u_A beschreiben. Dabei zeigt sich das Phänomen, dass grobporige Stoffe, die in der Regel eine geringere Kapillarleitfähigkeit aufweisen, in den Randbereichen rascher und stärker austrocknen als feinporige Baustoffe mit großer Kapillarleitfähigkeit. Da dicke Baustoffschichten langsamer trocknen als dünne, ist auch das Abmessungsverhältnis von Bedeutung, welches durch das Verhältnis von Oberfläche

zu Volumen des Bauteils ausgedrückt wird. Der Austrocknungsvorgang ist außerdem abhängig von der Zeit. Eine Beschreibung des Feuchteverlustes in Abhängigkeit von Zeit und Baustoffdicke liefert Gleichung 8.

$$u_0 - u_m(t) = \left[\frac{O}{V} \right]^2 * t \quad \text{Gl. 8}$$

mit

O = Bauteiloberfläche

V = Bauteilvolumen

t = Zeit

Des Weiteren lassen sich beim Austrocknungsvorgang wassergesättigter Körper zwei zeitliche Abschnitte unterscheiden. Im ersten Abschnitt erfolgt die Feuchteabgabe weitestgehend über den Feuchtigkeitsübergang auf der Bauteiloberfläche. Es herrscht eine in etwa konstante, zeitunabhängige Feuchtestromdichte und von den Kapillaren kann noch genügend Wasser aus dem Bauteilinneren nach außen gelangen, um an der Bauteiloberfläche zu verdunsten. Wenn dies nicht mehr möglich ist und der Wasserfaden in den Kapillaren abreißt, verliert die Kapillarleitung an Bedeutung und die Austrocknung geschieht hauptsächlich über Dampfdiffusion, welches ein wesentlich langsamerer Prozess ist.

Im allgemeinen treten bei Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen Diffusion und Kapillartransport in Kombination auf, weshalb eine getrennte Betrachtung dieser Phänomene die realen Zustände oft nur unzureichend darstellt. Sucht man nach Beschreibungen, welche das gleichzeitige Auftreten verschiedener Transportvorgänge mit modellieren, so liefert [56] hierzu einen Beitrag mit einem numerischen stationären Näherungsverfahren auf Basis der Speicherfunktion.

In der Realität findet man häufig mehrschichtige Bauteile und Temperatur und Speicherung sind instationär, das heißt, über die Zeit veränderlich. Will man dies zusätzlich berücksichtigen, so muss in der Regel auf numerische Verfahren zurückgegriffen werden. Ansätze hierfür auf Basis der Modelle von Kießl und Klopfer finden sich in [57, 59].

Für die Aufstellung numerischer Berechnungsmethoden zum instationären Feuchtetransport von Baustoffen werden gekoppelte Differentialgleichungen zur Beschreibung herangezogen. Solche Berechnungsmethoden ermöglichen die Entwicklung von Programmen, mit denen für beliebige Bauteile und Aufbauten der Feuchtedurchgang bei gegebenen hygrischen Randbedingungen simuliert werden kann. Ein Beispiel ist das Programm WUFI (Wärme und Feuchte instationär), welches vom Fraunhofer Institut Holzkirchen entwickelt wurde und auch im Bereich der Sanierung von feuchtegeschädigtem Mauerwerk Anwendung findet. Anwendungsbeispiele hierfür sind u. a. in [60] beschrieben worden. Und auch in [61] wurden für die Untersuchungen der Feuchtebeanspruchung von Mauerwerk numerische Simulationsverfahren verwendet, in denen besonderes Augenmerk auf die Modellierung des Verbundbereiches von Fugenmörtel und Mauerstein gelegt wurde.

Als Transport- und Speicherräume für Wasser in Baustoffen dienen die Poren eines Baustoffes. Die verschiedenen Porenarten kann man nach ihrer Beschaffenheit charakterisieren. Diese lassen sich unterteilen in offene Pore, Sackpore, isolierte oder geschlossene Pore und in den Flaschenhals oder Ink-Bottle-Pore [62]. Weitaus bedeutsamer ist die Differenzierung der Poren nach ihrer Größe. In [54] wird im Wesentlichen zwischen Mikroporen ($r < 10^{-7} \text{ m}$)¹⁰ und Makroporen ($r > 10^{-7} \text{ m}$) unterschieden. Während in den Makroporen Wasser ohne Einfluss der Porengeometrie flüssig transportiert wird, entsteht in den Kapillarporen Wassertransport durch kapillare Saugkräfte, die Mikroporen wiederum dienen hauptsächlich als Wasserspeicher, in ihnen kann außerdem Diffusion stattfinden, die allerdings wesentlich weniger effizient ist als der Kapillartransport. In [37] werden zur größenmäßigen Untergliederung des Porenraums die Begriffe Luftporen ($10^0 - 10^3 \mu\text{m}$), Kapillarporen ($10^{-2} - 10^2 \mu\text{m}$) und Gelporen ($10^{-3} - 10^{-2} \mu\text{m}$) gebraucht. Für Betonbauteile ist eine differenziertere Unterscheidung der Porenarten üblich [23]. Danach wird unterteilt in Gelporen (1 bis 10 nm), Schrumpfporen (ca. 10 nm), Kapillarporen (10 nm bis 100 μm), Luftporen (1 μm bis 1 mm) und Verdichtungsporen ($> 1 \text{ mm}$). In [73] wiederum werden die Porengrößen unterteilt in Luftporen (50 – 10 μm), in Kapillarporen (10 – 0,01 μm) und in Gelporen ($< 0,01 \text{ mm}$).

¹⁰ r bezeichnet den Zylinderporenradius und gilt nur für den Fall, dass die Porenwände senkrecht zum Querschnitt sind.

Für die Auswahl geeigneter Instandsetzungsmörtel, die einen dauerhaften Fugenschluss sowie Verträglichkeit mit den übrigen Mauerwerksmaterialien garantieren, ist nicht nur die Kenntnis der physikalisch-mechanischen und der chemisch-mineralogischen, sondern auch der feuchtetechnischen Einflüsse wichtig. Die dort gewonnenen Erkenntnisse sollten dann auf die Instandsetzungsmörtel übertragen und mit einbezogen werden.

Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Bei Betrachtung der Hydratations- und Gefügemodelle im System $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ließ sich feststellen, dass sich durch Zugabe chemischer Additive und von mineralischen Zusatzstoffen die Mikrogefüge der Calciumsulfatdihydrate gezielt beeinflussen lassen. Dieses Wissen sollte genutzt werden, die mechanischen Eigenschaften der zu entwickelnden Instandsetzungsmörtel definiert einzustellen. Die bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen an historischen Gipsmörteln sollten als Grundlage dienen, ein Anforderungsprofil für Instandsetzungsmörtel zu erarbeiten. Eigene Untersuchungen an historischen Gipsmörteln wurden dazu genutzt, das Anforderungsprofil detailliert zu erweitern. Die Kenntnisse über bestehende Mörtelkonzepte werden genutzt, um ein Konzept zur Entwicklung von dauerhaften Gipsmörteln zu erarbeiten. Basis sind Untersuchungen an historischen Gipsmörteln aus verschiedenen Bauwerken. Diese Mörtel werden zunächst detailliert untersucht, in wieweit sie den gestellten Anforderungen entsprechen bzw. um sie weiter zu optimieren.

Durch die Literaturlauswertung wurde deutlich, dass die zu entwickelnden Instandsetzungsmörtel keine ausblühfähigen Salze enthalten sollten. Dieser Punkt wurde als ein Teilbereich in das Anforderungsprofil mit aufgenommen. Durch die Literaturlauswertung wurde die Problematik einer möglichen Ettringit- und Thaumasitbildung in den entwickelten Gips-Kalk-Mörteln dargestellt. Genaue Untersuchungen sollten das vorhandene Bildungspotential dieser Minerale aufzeigen und eine Lösung für die entwickelten Gips-Kalk-Mörtel angeben.

Die Transportmechanismen für Feuchtigkeit in Abhängigkeit von der Porosität innerhalb der entwickelten Mörtel sind noch weitgehend ungeklärt. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit in einem weiteren Schritt unterschiedlich

feuchtebeanspruchte Gips-Kalk-Mörtel im Hinblick auf ihre physikalisch-mechanischen und hygrischen Eigenschaften untersucht.

Letztendlich sollte ein Weg aufgezeigt werden, wie man gezielt Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat-Basis entwickeln kann, die ausreichend dauerhaft und an den Mörtel des jeweiligen Objektes möglichst optimal angepasst sind.

3 Anforderungen an Instandsetzungsmörtel

3.1 Allgemeine Anforderungen

Frühere Untersuchungen (siehe Kapitel 2.2) haben gezeigt, dass die historischen calciumsulfathaltigen Mörtel nahezu monomineralisch aus Calciumsulfat-Dihydrat (Gips) bestehen. Da die Eigenschaften der Instandsetzungsmörtel an die Beschaffenheit der historischen Mörtel angeglichen und die Kompatibilität zwischen den historischen Mörteln und den Instandsetzungsmörteln gewährleistet werden sollten, muss der Anteil an calciumsulfatgebundenen Komponenten im Bindemittelanteil möglichst hoch sein. In den bisherigen Mörtelkonzepten (siehe Kapitel 2.3) wurden ca. 70-80 M.-% an CaSO_4 -Komponenten verwendet. Aufgrund des hohen Gehaltes an wenig witterungsresistenten CaSO_4 -Komponenten im Bindemittel muss die primäre Anforderung eine hohe Verwitterungsresistenz sein.

Die wesentliche Anforderung an die Frischmörteleigenschaften ist eine gute Verarbeitbarkeit. Dazu ist ein auf die jeweiligen Mörtel abgestimmter Wassergehalt erforderlich. Aus diesem Wassergehalt und dem Bindemittelgehalt ergibt sich bei Gipsmörteln der Wasser-/Bindemittel-Wert, der wiederum auch die Porosität und damit die Festigkeit und Dauerhaftigkeit mit bestimmt. Da sich die Frischmörteleigenschaften aus historischer Zeit nicht mehr reproduzieren lassen, ist es sinnvoll, im Anforderungsprofil die Frischmörteleigenschaften der DIN 18555, T.2 zu übernehmen. Die Konsistenz der Frischmörtel richtet sich dabei nach der Art des Einsatzes. So hat ein Mauermörtel eine plastischere Konsistenz (K_M 2 plastisch) als ein Fugendeckmörtel (K_M 1 steif). Des Weiteren muss der Instandsetzungsmörtel von jedem gelernten Handwerker auf der Baustelle zu verarbeiten sein. Der Begriff der „guten Verarbeitbarkeit“ lässt sich aber nicht eindeutig definieren. Indirekte,

praktische Bewertungskriterien wie die „Kellengängigkeit“, oder die „Flankenhaftung“ können dazu dienen, die Verarbeitbarkeit der Mörtel einzustufen.

Die Gefahr einer zu schnellen Austrocknung besteht, wenn durch kapillare Saugkräfte des Mauersteins dem Bindemittel das zum Abbinden notwendige Wasser entzogen wird. Dies ist eine Schadensursache für Risse und Absandungen des Mörtels. Der Wert des Wasserrückhaltevermögens beschreibt den in Prozent ausgedrückten Wasseranteil, der nach kapillarem Wasserentzug durch eine saugfähige Unterlage im Mörtel verbleibt. Das Wasserrückhaltevermögen sollte daher einen möglichst hohen Wert von $> 80 \%$ aufweisen. Eine Verarbeitbarkeitszeit von ca. einer Stunde sollte ebenfalls gewährleistet werden, um einen ausreichenden Verarbeitungszeitraum zur Verfügung zu haben. Dieser Zeitraum hat sich in der Praxis als sinnvoll erwiesen.

Bei den Festmörteleigenschaften gilt, dass der Mörtel möglichst weitgehend den mechanischen Eigenschaften des vorhandenen Altmaterials angeglichen werden sollte. Die in der Literatur angegebenen Werte für den E-Modul, die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit sowie die Gesamtporosität verschiedener historischer Mörtel (siehe Kapitel 2.2) zeigten große Unterschiede. Für die Druckfestigkeit ergab sich z. B. eine Bandbreite von $5 - 33 \text{ N/mm}^2$, für die Gesamtporosität eine von $5 - 35 \text{ Vol.-%}$. Dies zeigt, dass allgemeingültige Anforderungen nur sehr begrenzt formuliert werden können. Die Festmörteleigenschaften müssen daher immer bauwerksindividuell eingestellt werden.

Des Weiteren sollte der Gehalt an ausblühfähigen Elementen wie Natrium und Kalium in einem Instandsetzungsmörtel sehr gering sein. Nicht zuletzt spielt auch die Ästhetik des Erscheinungsbildes eine entscheidende Rolle. So sollte die Farbe des Instandsetzungsmörtels auf die der Originalsubstanz angepasst werden.

Daraus ergeben sich die im folgenden angegebenen Anforderungen.

Allgemeinen Anforderungen:

Bindemittelgehalt:	≥ 70 M.-% an CaSO_4 -Komponenten
Ausbreitmaß:	(K_M 2 plastisch) als Mauermörtel oder (K_M 1 steif) als Fugendeckmörtel
Wasserrückhaltevermögen:	$> 80\%$
Verarbeitbarkeitszeit:	ca. 1 h
Wasseraufnahmekoeffizient:	$< 10 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}$
Ausblühneigung:	keine

Individuelle bauwerksbezogene Anforderungen:

Gesamtporosität
E-Modul
Biegezugfestigkeit
Druckfestigkeit
Farbe

3.2 Untersuchungsergebnisse historischer Mörtel aus beprobten Gebäuden
Experimentelle Untersuchungen; Grundlagen

Um eine dauerhafte Instandsetzung historischer Gebäude zu erreichen, ist eine vorherige sorgfältige Untersuchung des historischen Materials des zu sanierenden Objektes notwendig. Dies umfasst zunächst eine sorgfältige Probennahme am Objekt. Danach sollte eine Anpassung der Instandsetzungsmaterialien an die vorhandenen Materialien erfolgen. Für diese Optimierungen müssen aus der Analyse des Mörtels klar definierte Anforderungen abgeleitet werden.

Durch die gezielte Bestimmung verschiedener Kennwerte an historischen Mörteln lassen sich Erkenntnisse über deren Zustand und Verhalten gewinnen. Dies sind z. B. Aussagen darüber, warum im Einzelfall Schäden aufgetreten sind und wodurch sie sich erklären lassen, oder auch warum der jeweilige historische Mörtel schadensfrei die Verwitterung überdauert hat. Entsprechend den hohen Anforderungen an das Material und die Arbeitsweise und auch der Funktion im oder am Bauwerk werden unterschiedliche physikalische oder stoffliche Eigenschaften eines Mörtels verlangt. Dies erfordert eine gezielte und genaue Vorbereitung der Probennahme, da die

Probenzahl, die Probenmenge und die Probenmaße von den unterschiedlichen Untersuchungsmethoden, aber auch von den Gegebenheiten am Bauwerk (welches Probenmaterial ist in welcher Probenmenge verfügbar) abhängen. Bei historisch wertvoller Bausubstanz ist also jedes Mal von neuem zu entscheiden, ob und in welcher Menge Originalmaterial entnommen wird, um für die Konservierung die optimalen Entscheidungsgrundlagen zu erhalten.

Dabei sind für ein besseres Verständnis des Bauwerkszustandes die Baugeschichte und die Nutzung einschließlich der Datierung, sowie die Schadens- und Restaurierungsgeschichte und die Umgebungssituation von Bedeutung. Die Baugeschichte dient dabei als Grundlage für ein möglichst umfassendes Verständnis des Gesamtobjektes und kann bereits mögliche bauschädliche Zusammenhänge aufzeigen. Mit Hilfe dieser Dokumentation wird es möglich, einen direkten Bezug von der später im Labor vorliegenden Probe zum Objekt und den damit verbundenen Fragen - technologischer Befund, Schäden und Schadensursachen, erforderliches Konservierungs- und Restaurierungskonzept - herzustellen. Diese Dokumentation kann auch als Entscheidungshilfe für die spätere Probennahme und Untersuchung dienen.

An zwei Objekten, die im folgenden näher beschrieben werden, wurden Proben entnommen, und im Labor charakterisiert. Die Proben wurden dabei mit Hammer und Meißel entnommen, während des Transportes in einem verschlossenen Plastikbehälter und im Labor im Klimaraum bei 20°C und 65% Luftfeuchtigkeit gelagert. Bestimmt wurden der dynamische E-Modul, die Druckfestigkeit nach DIN 18555, T.9 im Teilflächenverfahren, der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient (WAK) nach DIN 15148, die Phasenzusammensetzung mittels Röntgendiffraktometeranalyse und die Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie (MIP). Die Untersuchungsmethoden sind in Kapitel 4 näher beschrieben.

Die Untersuchungen sollten zum Einen die allgemeinen Anforderungen nach Kapitel 3.1 bestätigen. Anhand der Untersuchungsergebnisse der Mörtel, die der St. Petri Kirche zu Bosau entnommen worden sind, sollte dann ein auf dieses Objekt abgestimmtes Anforderungsprofil aufgestellt werden. Die Instandsetzungsmörtel wurden dann auf dieses Anforderungsprofil hin optimiert.

Burgruine Hohnstein, Landkreis Nordhausen

Die Ruine der Burg Hohnstein liegt bei Osterode, in der Nähe von Neustadt im Südharz und gehört dem Landkreis Nordhausen, Thüringen an. Sie ist auf Bild 10 abgebildet.

Zwischen den Jahren 1110-1116 n. Chr. wurde das Gebiet um den Hohnstein von einem Grafen von Sangershausen erworben und mit dem Burgbau begonnen. Die Gipssteinvorkommen in der Nähe von Hohnstein sind Steigertal und Krimmderode, und es ist anzunehmen, dass das verwendete Rohmaterial zur Bindemittelherstellung von dort stammt.

1201-1210 gründete ein Nachfahre des Grafen von Hohnstein die Dynastie der Grafen zu Stolberg, die über mehrere Jahrhunderte mit einigen Unterbrechungen im Besitz der Burg Hohnstein waren. Seit 1627 ist die Burg aufgrund einer Brandlegung eines sächsischen Oberst Vitztum v. Eckstädt eine Ruine und die über 500 jährige Aktivzeit der Burg war zu Ende [74]. Eine weitere Zerstörung der Burg kam hinzu, da es zu der damaligen Zeit durchaus üblich war, Ruinen als Steinbrüche zu nutzen und das Material zum Aufbau anderer Bauten in der Umgebung zu entwenden.



Bild 10: Die Burgruine Hohnstein

Ab 1822 war die Ruine wieder im Besitz der Grafen zu Stolberg, die in den Jahren 1872, 1890 und 1914 umfangreiche Erhaltungsmaßnahmen durchführen ließen [74]. Seit 1945 gehört die Ruine Hohnstein dem Landkreis Nordhausen, aber erst seit den 90er Jahren sind wieder Instandsetzungs- und Konservierungsarbeiten durchgeführt worden.

Die Phasenanalyse der Mörtel ergab, dass diese nahezu monomineralisch aus Calciumsulfat-Dihydrat (siehe Bild 11) und geringen Mengen an Calciumsulfat-Anhydrit bestanden. Es kann einem noch nicht hydratisiertem Relikt eines Hochbrandproduktes zugeordnet werden. Der nachgewiesene Quarz war Teil der Gesteinskörnung.

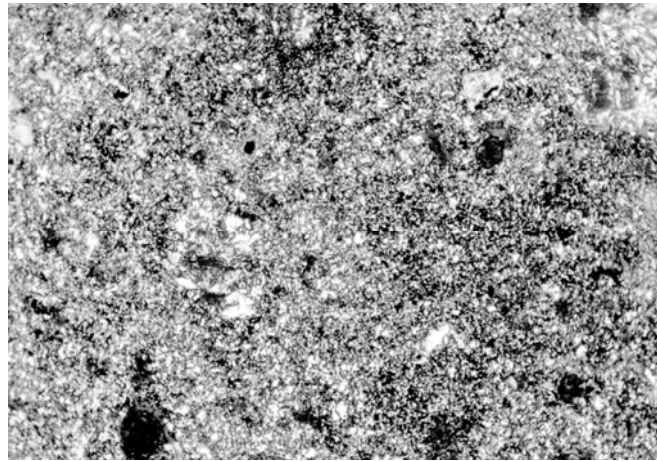


Bild 11: Feinkristallines Gefüge aus Calciumsulfat- Dihydrat des historischen Gipsmörtels der Burg Hohnstein; Lichtmikroskop, Durchlicht, Bildbreite 1,52 mm

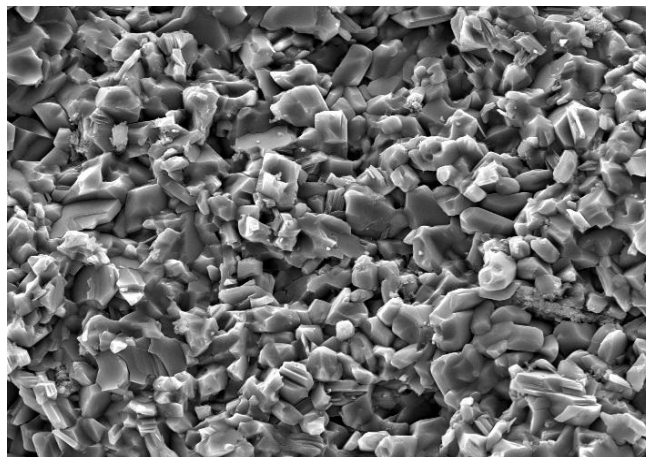


Bild 12: Gefügebau aus grobkörnigen Kristallen des historischen Mörtels der Burg Hohnstein. Er wirkt in seiner Gesamtheit recht dicht
REM-Aufnahme, SE-Detektor, Bildbreite: 145µm

Die weiteren Untersuchungsergebnisse sind als Mittelwerte aus drei Proben im Folgenden aufgelistet. Die Einzelwerte können den Tabellen A 3 im Anhang entnommen werden.

Druckfestigkeit:	18 N/mm ²
Trockenrohdichte:	2,0 g/cm ³
Gesamtporosität:	23 Vol.-%
Wasseraufnahmekoeffizient:	3,1 kg/m ² *√h

Die Gesamtporosität teilt sich in 5 Vol.-% Luftporen, 17 Vol.-% Kapillarporen und 1 Vol.-% Gelporen auf. Die Größe der Poren sind in Kapitel 4.5 angegeben.

St. Petri Kirche, Bosau

Bosau liegt am Plöner See in Schleswig Holstein zwischen Lübeck und Kiel. Nach einer kurzen Bauzeit von nur 3 Jahren wurde die Kirche 1152 durch Vicelin geweiht.

Das Aussehen der Kirche zu ihrer Gründungszeit lässt sich nicht mehr rekonstruieren, da die Kirche im Laufe der Jahrhunderte mehrfach umgebaut wurde. Das heutige Erscheinungsbild lässt sich bis zum 30 jährigen Krieg zurückführen. Seit diesem Zeitpunkt durchgeführte Veränderungen wurden anhand umfangreicher Sanierungen in den Jahren 1964 - 1969 wieder rückgängig gemacht [31]. So besteht die Kirche heute aus einem Langhaus, Chor und Apsis sowie einem Turm (siehe Bild 13). In früherer Zeit war die Außenfläche vollständig mit Gips verputzt, von diesen Flächen sind aber nur noch Bruchstücke historischen Materials vorhanden. Vermauert wurde die Kirche mit Feldsteinen aus Quarzit, Diorit und Granit mit Druckfestigkeiten von (240 – 275 N/mm²)¹¹. Die Farbe der historischen Mörtel der St. Petri Kirche zu Bosau erscheint als weiß bis hellgrau.

Schäden machten es im 20. Jahrhundert notwendig, an der Kirche umfangreiche Sanierungsarbeiten durchzuführen. Eine umfangreiche Schadensaufnahme ab dem Jahr 1993 ergab, dass gerade an sanierten Lokalisationen auffällige Schadensbilder zu bemerken waren. Neben Rissen kam es gerade auf den zementhaltigen

¹¹ Messwert des iBMB, TU Braunschweig

Fugenmörteln zu Salzausblühungen und großflächigen Abplatzungen, die sich vorzugsweise zwischen historischem Material und neu aufgebrachtem Fugenmörteln gebildet hatten. Stellen mit ausschließlich historischem Gipsmörtel zeigten dagegen keine Schäden.



Bild 13: St. Petri Kirche zu Bosau

Die St. Petri Kirche wurde an verschiedenen ausgewählten Stellen beprobt (siehe hierzu Bild 14), um Erkenntnisse über das historische und das bis dato eingesetzte Instandsetzungsmaterial zu erhalten.



Bild 14: Entnahmestelle zweier Proben an der St. Petri Kirche in Bosau an der Südseite

Bild 14 zeigt die Entnahmestellen zweier Proben an der Südseite der St. Petri Kirche zu Bosau. Die Analyse der wasserlöslichen Salze (Beschreibung siehe Kapitel 4)

ergab, dass es sich bei den Ausblühungen vorwiegend um Sulfatverbindungen, vereinzelt auch um Nitratverbindungen handelte. In den Kontaktflächen kam es über das gesamte Kirchenschiff verteilt zum Auftreten von Thaumazit und den im folgenden aufgelisteten Salzverbindungen:

Thenardit	Na_2SO_4	Hexahydrit	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Glaserit	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	Epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Syngenit	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	Nitrokalit	KNO_3
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Darapskit	$\text{Na}_3 \text{NO}_3 \text{SO}_4 \text{H}_2\text{O}$

Als Quelle der Kationen der Salze Natrium und Kalium kommt nur der für die Instandsetzung verwendete Zementmörtel in Frage. Die Phasenanalyse dieses Mörtels ist im Anhang A 3 in Tabelle A 3.6 mit der Bezeichnung BZ1 wiedergegeben.

Die Phasenanalyse der historischen Mörtelproben ergab, dass auch diese nahezu monomineralisch aus Calciumsulfat- Dihydrat bestanden. Zusätzlich waren geringe Mengen an Anhydrit und Quarz vorhanden; der Quarz gehörte zur Gesteinskörnung, das CaSO_4 - Anhydrit war ein noch nicht hydratisiertes Relikt eines Hochbrandgipses. Die zugehörigen Phasenanalysen der Proben sind in Tabelle A 3.5 (Anhang A 3) wiedergegeben.

Die weiteren Untersuchungsergebnisse sind als Mittelwerte von drei Proben im folgenden aufgelistet. Die Einzelwerte können den Tabellen A 3 im Anhang entnommen werden.

E- Modul:	4,5 kN/mm ²
Druckfestigkeit:	12 N/mm ²
Dichte:	1,8 g/cm ³
Gesamtporosität:	25 Vol.-%
Wasseraufnahmekoeffizient:	n.b. aufgrund der Probengeometrie

Die Gesamtporosität teilt sich auf in 5 Vol.-% Luftporen, 19 Vol.-% Kapillarporen und 1 Vol.-% Gelporen auf. Die Größe der Poren sind in Kapitel 4.5 angegeben.

3.3 Beispiel für ein objektbezogenes Anforderungsprofil

Die Untersuchungsergebnisse der historischen Mörtel der St. Petri Kirche in Bosau sollen nun in Kombination mit den allgemeinen Anforderungen an Instandsetzungsmörtel aus Kapitel 3.1 zur Aufstellung eines objektbezogenen Anforderungsprofils dienen.

Da die Phasenanalyse der historischen Mörtelproben in beiden Fällen ergab, dass es sich um nahezu monomineralisches Calciumsulfat-Dihydrat handelte, wurde die Anforderung aus Kapitel 3.1 übernommen, den Instandsetzungsmörtel mit > 70 M.-% an CaSO_4 -Komponenten im Bindemittelanteil herzustellen. Wegen des hohen Anteils an CaSO_4 -Komponenten musste der Verwitterungsresistenz der Instandsetzungsmörtel besonderer Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ebenfalls übernommen wurden die allgemeinen Anforderung an das Ausbreitmaß, an das Wasserrückhaltevermögen und an die Verarbeitbarkeitszeit, da es sich hierbei um Frischmörteleigenschaften handelt, die nicht bauwerksindividuell eingestellt werden müssen.

Als Zielgröße für den dynamischen E-Modul wurde ein Wert zwischen 4 – 5 kN/mm² gewählt, angepasst an den gemessenen Wert der Proben der St. Petri Kirche. Entsprechend wurde eine Druckfestigkeit von ca. 12 N/mm², eine Rohdichte im Bereich von 1,8 g/cm³ und eine Gesamtporosität von ca. 25 Vol.-% angestrebt. Die Gesamtporen sollten sich wie auch bei der Burgruine Hohnstein aus rd. 5 Vol.-% Luftporen, rd. 1 Vol.-% Gelporen rd. 18 Vol.-% Kapillarporenaufteilen.

Der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient (WAK) konnte für die Proben der St. Petri Kirche aufgrund der ungünstigen Probengeometrie nicht bestimmt werden. Für die Proben des ähnlichen Mörtels der Burg Hohnstein ergaben sich Werte von rd. 3,1 kg/m²*√h. Deshalb wurde der im Kapitel 3.1 festgestellte Wert von < 10 kg/m²*√h auch für den Instandsetzungsmörtel der St. Petri Kirche zugrunde gelegt.

Es durften möglichst keine zusätzlichen ausblühfähigen Salze eingetragen werden. Die Farbe des Mörtels sollte weiß bis hellgrau sein.

Daraus ergab sich das im folgenden angegebene individuelle Anforderungsprofil für die St. Petri Kirche zu Bosau:

Bindemittelgehalt:	≥ 70 M.-% an CaSO_4 -Komponenten
Ausbreitmaß:	(K_M 2 plastisch) für Mauermörtel oder (K_M 1 steif) für Fugendeckmörtel
Wasserrückhaltevermögen:	$> 80\%$
Verarbeitbarkeitszeit:	ca. 1 h
E-Modul:	4 - 5 kN/mm^2
Druckfestigkeit:	ca. 12 N/mm^2
Dichte:	ca. 1,8 g/cm^3
Gesamtporosität:	ca. 25 Vol.-%
Luftporen:	ca. 5 Vol.-%
Kapillarporen:	ca. 18 Vol.-%
Gelporen:	ca. 1 Vol.-%
Wasseraufnahmekoeffizient:	$< 10 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}$
Ausblühneigung:	keine
Farbe:	weiß bis hellgrau

Der zu entwickelnde Instandsetzungsmörtel sollte an dieses Anforderungsprofil angepasst und dazu entsprechend optimiert werden. Dazu war es in einem nächsten Schritt notwendig, die bestehenden Mörtelkonzepte (siehe Kapitel 2.3) in ein für diese Arbeit notwendiges Konzept einzubauen.

3.4 Mörtelkonzept

Ein Grundansatz dieser Arbeit war die Verwendung von kommerziell erhältlichen Ausgangsstoffen, um eine langfristige qualitätsgesicherte Herstellung mit ausreichend vorhandenen reproduzierbaren Rohstoffen zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurden handelsübliche Halbhydrate (α -HH, β -HH) und Anhydrit als Bindemittel eingesetzt.

Mischungsgrundlage waren die aus der Literatur entnommenen Mischungen (siehe Kapitel 2.3) [3, 8].

- α -HH / β -HH / Kalkhydrat im Verhältnis 20/50/30 [M.-%]
- Anhydrit / Kalkhydrat im Verhältnis 80/20 [M.-%]

Es war zu berücksichtigen, dass Halbhydrat verzögert und Anhydrit angeregt werden muss. Durch den Einsatz von Weinsäure ändern sich Tracht und Habitus der ausgebildeten Gipskristalle. Durch die sich bildenden gröberen Kristalle sollten die Verwitterungsresistenz und die mechanischen Eigenschaften den Anforderungen beeinflusst werden. Als Anreger für den Anhydritanteil im Bindemittel wurde Kaliumsulfat gewählt, da dies dem derzeitigen Stand der Technik entsprach.

Je höher der Anteil an hydraulischen Komponenten im Kalkhydrat ist, desto höher sollte auch die Verwitterungsresistenz der Gips-Kalk-Mörtel sein. Ist der Gehalt an hydraulischen Komponenten allerdings zu hoch, so erhöht sich auch das Ettringit- und Thaumistbildungspotential. Es galt nun zu untersuchen, mit welchem Kalkhydrat in der Summe der Eigenschaften die Anforderungen für die Mörtelmischungen am ehesten erreicht wurden. Es wurden Kalkhydrate CL 80 und CL 90 nach DIN EN 459 ausgewählt.

Die Überlegungen zum Mörtelkonzept sahen vor, den Gehalt an α -HH zu β -HH im Bindemittelanteil zu variieren, um die Festigkeiten und E-Moduli der Mörtel bei ansonsten gleichbleibenden chemisch-mineralogischen Eigenschaften einstellen zu können.

Als Gesteinskörnung wurde wie in [8] empfohlen Kalksteinbrechsand genommen.

4 Untersuchungsprogramm zur Entwicklung eines Instandsetzungsmörtels auf Calciumsulfat- Basis

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Untersuchungsverfahren beschrieben.

4.1 Komponentencharakterisierung

4.1.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung und die spez. Oberfläche der Ausgangsstoffe wurden mit einem Laserbeugungsanalysator, Typ Coulter LS 230, bestimmt. Er kann Korngrößen im Bereich von 0,04 bis 2000 μm analysieren. Dabei wird Laserlicht auf die Partikel gerichtet und an ihnen gebeugt. Je nach Partikelgröße entstehen charakteristische Beugungsbilder. Die Lichtintensität und die Lage dieser Beugungsbilder werden mit Detektoren erfasst und mit einem Algorithmus in eine Volumenverteilung umgerechnet.

Gesteinskörnungen $> 2000 \mu\text{m}$ wurden durch Sieben (Maschinen- oder Hand-siebung) nach DIN EN 1015-1 bestimmt.

4.2 Frischmörteleigenschaften

4.2.1 Konsistenz und Verarbeitbarkeit

Geprüft wurden die Konsistenz und der Wasseranspruch der Mörtel nach DIN 18555, Teil 2 mit dem Ausbreittisch nach DIN 160, Teil 3. Dabei wurden alle Versuchsmörtel im Labor zum besseren Vergleich zunächst einheitlich auf ein Ausbreitmaß von $16,0 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$ (K_M 2 plastisch) eingestellt, wie es für Mauermörtel üblich ist. Für den Einsatz als Fugendeckmörtel wurden auch Labormörtel mit einem Ausbreitmaß von $12,0 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$ (K_M 1 steif) untersucht.

Die Mörtel wurden hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit nach folgenden Bewertungskriterien im Labor von Anwendungstechnikern eingestuft.

Bewertungskriterien der Mörtel

- Anmischbarkeit
- Kellengängigkeit
- Verarbeitbarkeit
- Fugenglattstrich
- offene Zeit
- Klebrigkeit Kelle
- Klebrigkeit Stein
- Flankenhaftung
- Rissbildung

Bewertungspunkte

- + gut
- o neutral
- schlecht

4.2.2 Verarbeitungszeit

Der Versteifungsbeginn und das Versteifungsende der Labormörtel wurde nach DIN 1168, Teil 2 / DIN 18555, Teil 2 bestimmt. Als Gerät kam dabei ein Vicatgerät mit Tauchkonus und Auslösevorrichtung zum Einsatz.

4.2.3 Luftporengehalt und Rohdichte

Der Luftporengehalt und die Rohdichte des Frischmörtels wurden nach DIN 18555, Teil 2 im Luftporentopf bestimmt.

4.2.4 Wasserrückhaltevermögen

Das Wasserrückhaltevermögen eines Frischmörtels ist der in Prozent ausgedrückte Wasseranteil, der nach dem kapillaren Wasserentzug durch eine saugfähige Unterlage im Mörtel verbleibt. Für eine gute Flankenhaftung der Mörtel sollte der Wert des Wasserrückhaltevermögens möglichst hoch und nicht unter 80% sein. Das Wasserrückhaltevermögen (WRV) wurde mittels Filterplattenverfahren nach DIN 18555, Teil 7 geprüft.

4.2.5 Hydratationswärmeentwicklung

Die Hydratationswärmeentwicklung der Proben wurde mit einem Kalorimeter TAM AIR der Firma C3 Prozess- und Analysetechnik gemessen. Das Gerät misst die Hydratationswärme beim Abbinden der Proben als Funktion über die Zeit. Der geregelte Thermostat ermöglicht Messungen im Bereich von 15 °C bis 60 °C unabhängig von der Umgebungstemperatur. Standardmessungen werden in geschlossenen Glasampullen mit Arbeitsvolumina von ca. 20 ml bei 20 °C

durchgeführt. Quantitativ bestimmt werden die Hydratationswärme und der Hydratationsgrad sowie die Reaktions-/Abbindezeit in Abhängigkeit von der Temperatur und/oder mit Zugabe von Zusatzmitteln.

4.3 Herstellung und Lagerung der Proben

Als Prüfkörper für die Untersuchungen der Festmörteleigenschaften wurden nach DIN 1164, Teil 7, Prismen der Abmessungen (4 cm * 4 cm * 16 cm) hergestellt. Sie wurden anschließend für einen Tag in der Schalung belassen. Nach dem Ausschalen wurden sie für 7 bzw. 28 Tage im Klimaraum mit 20 °C und bei 65% relativer Luftfeuchtigkeit (20/65) gelagert.

Für die Untersuchungen des Thaumasitbildungspotentials wurden die Prüfkörper sofort nach dem Ausschalen bei 5 °C und 95% relativer Luftfeuchte (5/95) gelagert, um optimale Bildungsbedingungen für Thaumasit zu erhalten.

Für die Untersuchungen der Verwitterungsresistenz wurden die hergestellten Prismen nach dem Ausschalen für 28 Tage im Klimaraum (20/65) aufbewahrt und danach nach Abschnitt 4.4.9.1 geprüft.

4.4 Festmörteleigenschaften

4.4.1 Festigkeiten

4.4.1.1 Bestimmung des dyn. Elastizitäts- Moduls

Der dynamische E-Modul wurde mit Hilfe eines Steinkamp Ultrasonic Tester BP-7 der Firma Wekob System Engineering (DIN/ISO 8047) an den erhärteten Mörtelprismen nach 7 und 28 Tagen gemessen. Das Messverfahren arbeitet mit Impulsregelung und Frequenzanalyse. Der Probekörper wird durch einen mechanischen Impuls in Longitudinalrichtung angeregt. Dabei wird seine Eigenfrequenz analysiert und als Laufzeit von zwei Perioden angegeben. Mittels dieser Laufzeit sowie der geometrischen Abmessung und der Rohdichte des Prüfkörpers, lässt sich der dynamische E-Modul berechnen.

4.4.1.2 Bestimmung der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit

Die Druck- und die Biegezugfestigkeit wurde nach DIN EN 196-1 mit einer Universalprüfmaschine der Firma Instron, Modell 6025 im Alter von 7 und 28 Tagen geprüft. Für die Untersuchungen zur Bestimmung des Thaumasitbildungspotentials wurden zusätzlich die Biegezug- und die Druckfestigkeiten nach einer Erhärungszeit von 56 und 90 Tagen bestimmt.

4.4.1.3 Druckfestigkeit im Teilflächenverfahren

An den Mörtelproben, die den historischen Gebäuden entnommen wurden, wurde die Druckfestigkeit im Teilflächenverfahren nach DIN 18555, Teil 9 bestimmt. Die Untersuchungen wurden mit einer Prüfpresse der Firma Instron, Modell 6025, durchgeführt, nachdem die Probekörper trocken auf die Prüfkörpergröße gesägt worden waren.

4.4.2 Rohdichte

Die Rohdichte wurde nach DIN 18555, T3 nach Luftlagerung (20/65) und im Alter von 7 und 28 Tagen vor der Biegezugprüfung bestimmt.

4.4.3 Wasseraufnahmekoeffizient

Die Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme ermöglicht die Beurteilung des kapillaren Saugens von Wasser oder einer Versuchslösung in das Kapillarporensystem eines porösen Stoffes. Das zu prüfende Material wird dabei mit der Prüfkörperunterseite 10 mm in die Flüssigkeit gestellt und saugt entgegen der Schwerkraft durch Kapillarkräfte die Flüssigkeit auf. Das Verfahren dient zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten ω [kg/m²√h], der sich aus der zeitabhängigen Massezunahme der Probe und der Größe der Saugfläche nach DIN 15148 ergibt. Mit diesen Ergebnissen lassen sich dann Aussagen über das Kapillarverhalten und über das Feuchteverhalten eines Baustoffes machen.

4.4.4 Widerstand gegen Frost- Tau- Wechsel

Durch diese Prüfung wird der Widerstand der Festmörteln gegen Frostbeanspruchung beurteilt. Die Prüfung wurde in Anlehnung an [17] durchgeführt. Nach 60 Tagen Lagerung im Klima (20/65) wurden die Prismen halbiert, zwei Tage unter Wasser gelagert und anschließend gewogen. Die Prismenhälften wurden danach in dampf- und wasserdichte Polyethylen-Folie eingeschweißt.

Die Prismenhälften wurden dann insgesamt 50 Frost-Tauwechsel-Zyklen ausgesetzt. Ein Zyklus setzt sich dabei wie folgt zusammen:

- Abkühlen auf -20°C
- 4 Stunden Haltezeit
- Aufheizen auf $+20^{\circ}\text{C}$
- 4 Stunden Haltezeit

Daraus ergab sich eine Gesamtdauer eines Zyklus von 8 Stunden.

4.4.5 Ausblühneigung

Die Ausblühneigung der untersuchten Mörtel wurde in Anlehnung an [17] ermittelt. Dabei wurden 28 Tage alte Mörtelprismen zunächst für 24 Stunden stirnseitig 10 mm tief in Wasser gestellt und danach über einen Zeitraum von 48 Stunden im Klimaraum (20/65) an der Luft gelagert. Nach insgesamt 20 derartiger Zyklen wurden vorhandene Ausblühungen vorsichtig abgelöst, gewogen und röntgenographisch untersucht.

4.4.6 Feuchtedehnung

Um das Quellen und Schwinden der Prüfkörper unter den beiden unterschiedlichen klimatischen Bedingungen (20/65) und (5/95) beurteilen zu können, wurde die Längenänderung gemessen. Dadurch lassen sich Rückschlüsse über Feuchtigkeitsaufnahme bzw. Feuchtigkeitsabgabe, aber auch über die Bildung etwaiger Treibmineralien ziehen.

Die Messungen erfolgten gemäß DIN 52450. Für die Messung wurden Messzapfen vom Typ 2 (Form C) und ein Messgerät vom Typ C (siehe Bilder 15 und 16) verwendet. Mit der Messung wurde sofort nach dem Ausschalen begonnen. Sie

erfolgte über einen Zeitraum von 90 Tagen. Dabei wurde in den ersten zwei Wochen im Abstand von ein bis drei Tagen, und ab der dritten Woche wöchentlich gemessen.



Bild 15: aufgeklebter Messzapfen vom Typ 2 (Form C)

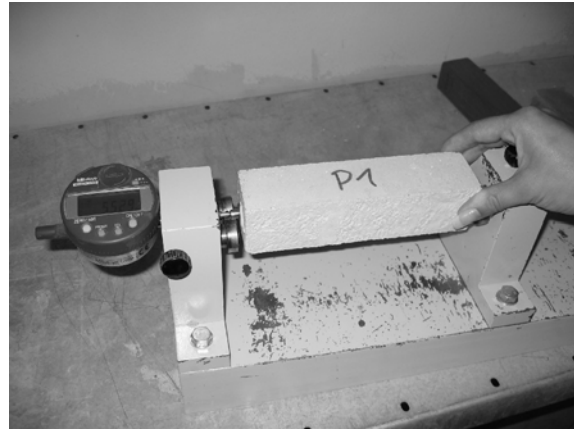


Bild 16: Messgerät Typ C

4.4.7 Analyse wasserlöslicher Salze

Der Salzgehalt wurde durch Eluation mit Wasser bestimmt. Untersucht wurden Mörtelproben, die der St. Petri Kirche zu Bosau entnommen wurden. Die bis zur Gewichtskonstanz bei 40°C getrocknete und gemörserte Probe wurde mit der hundertfachen Menge (1:100) bidestilliertem Wasser versetzt und 20 min gerührt. Nach dem Filtrieren wurden aus dem Filtrat mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) die Alkalien Natrium (Na^+) und Kalium (K^+) bestimmt. Das Filtrat wurde zur Analyse der AAS in ein Fremdlabor gegeben.

4.5 Gefüge und Porosität

Mit der Rasterelektronenmikroskopie (REM) können die Topographie rauer Oberflächen sowie die Kristallausbildung und ihre Orientierung in den Proben optisch festgestellt werden. Durchgeführt wurden die Untersuchungen an einem REM der Firma PHILIPS vom Typ XL 30 mit angeschlossener energiedispersiver Röntgenanalytik (EDX) der Firma EDAX vom Typ PV 9800.

Zur Ermittlung des Porenraums diene die Quecksilberdruckporosimetrie (MIP). Damit können insbesondere die Kenngrößen Gesamtporosität, Gesamtporenfläche (spez. Oberfläche), Porenradienverteilung und Porenradius ermittelt werden.

Die Gesamtporosität bestimmt unter anderem die Festigkeit und den E-Modul des Mörtels mit. Die Wasseraufnahme und das Trocknungsverhalten wird in erster Linie durch die Kapillarporosität bestimmt.

Die Messungen wurden mit einem Porosimeter AUTOPORE II 9220 der Firma MICROMERITICS durchgeführt, das Poren mit Radien von $2,23 \cdot 10^5$ nm erfassen kann. Die gemessenen Daten werden in einer Weise umgerechnet, dass die mittels MIP bestimmte offene Gesamtporosität in die folgenden Bereiche aufgeteilt wird:

> 10.000 nm	Luftporen
> 30 nm < 10.000 nm	Kapillarporen
< 30 nm	Gelporen

4.6 Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie

Die Röntgendiffraktometeranalyse wird zur Bestimmung kristalliner Phasen eines Feststoffes herangezogen. Geeignet ist diese Methode für kristalline Phasen, die mit einem Massenanteil größer ca. 3% in einer Substanz vorhanden sind.

Die Untersuchungen wurden an einem Röntgendiffraktometer der Firma PHILIPS, Mod. PW 1710 durchgeführt.

Untersucht wurden die Mörtelproben aus den in Kapitel 3.2 beschriebenen Objekten. Repräsentative Teile einer Probe wurden zunächst bei 40°C getrocknet und anschließend auf eine Kornfraktion von $< 40 \mu\text{m}$ zerkleinert. Für die Auswertung wurden die einzelnen Signalintensitäten als Funktion der Beugungswinkel 2θ graphisch dargestellt. Für jede Substanz treten charakteristische Peaks auf. Die Phasenauswertung fand unter Zuhilfenahme der JCPDS- Datenbank statt.

4.7 Verwitterungsresistenz

4.7.1.1 Laborbewitterung

Um das Verwitterungsverhalten zeitgerafft untersuchen zu können, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der es ermöglicht, Probekörper zu definierten Zeiten und unter definierten klimatischen Bedingungen zu beregnen. Als Probekörper wurden Normprismen mit den Abmessungen (4 cm x 4 cm x 16 cm) gewählt, die vor Versuchsbeginn 28 Tage im Klimaraum bei (20/65) gelagert wurden. Die Beregnung erfolgte in einem Klimaschrank und über ein gleichmäßig verteilendes Sprühsystem der Marke Gardena, ursprünglich konzipiert für die Beregnung von Pflanzen in einem Gewächshaus. Die Durchflussmenge betrug 2,0 l/min*m². Nach etwa 30 Minuten war die Durchfeuchtung der Proben erreicht. Dies wurde gravimetrisch ermittelt. Danach wurden die Proben erst 3 Stunden bei 40 °C und 40% rel. Luftfeuchte und dann nochmals 2,5 Stunden bei 20 °C und 40% rel. Luftfeuchte getrocknet. Um ein wiederholtes Durchfeuchten und anschließendes Trocknen zu simulieren, wurde dieser Zyklus mehrmals wiederholt, dabei benötigten 28 Zyklen eine Zeit von 7 Tagen.

Durch Vorversuche an Streifen wurde ermittelt, bis in welche Tiefe der beregneten Oberfläche der Prismen eine vollständige Durchtrocknung erreicht wurde. Dazu wurden Prismen der Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm auf verschiedene Dicken (5 / 10 / 15 / 20 / 25 mm) trocken gesägt und bis auf eine Stirnfläche von 40 mm x 40 mm mit Wachs abgedichtet. Diese Probekörper durchliefen den wie oben beschriebenen Bewitterungszyklus im Klimaschrank.

4.7.1.2 Außenbewitterung

Um das Verhalten und die Eignung der Mörtel für den Außenbereich zu untersuchen, wurden Probemauern aus Ziegel errichtet, die auf dem Institutsgelände langfristig im Außenbereich der natürlichen Atmosphäre ausgesetzt wurden und noch werden. Die Testmauern haben jeweils die Abmessungen von 1,0 m x 1,2 m x 0,8 m (H x B x T) und wurden mit einer Edelstahlabdeckung gegen Feuchtigkeit von oben geschützt (siehe Bild 17).



Bild 17: Ansicht der Probemauern auf dem Laborhof

Des Weiteren wurden verschiedene, auf der Basis des nachfolgend beschriebenen Vorgehens entwickelte Instandsetzungsmörtel an den in Kapitel 3 beschriebenen Objekten in Testflächen appliziert und ihre Eignung für den Außenbereich und an den unterschiedlichen Steinvarietäten wiederholt begutachtet.

4.8 Darstellung der Mörtelgefüge mit „Pore-Cor“

„Pore-Cor“ steht für „Pore-Level Properties Correlator“ und ist ein Software Paket der Firma MICROMERITICS. Das Programm Pore-Cor ermöglicht die rechnerische Untersuchung von porösen Feststoffen mit Porengrößen $> 2 \text{ nm}$. Es modelliert dazu die Porenraumgeometrien nach festgelegten Modellen, welche aus kubischen Poren zusammengesetzt sind, die wiederum durch kapillarenförmige Röhren, die sogenannten Porenkanäle, verbunden sind. Nach der Wahl verschiedener im Programm vorgegebener Modellparameter wird eine quecksilberdruckporosimetrische Untersuchung nachgestellt, welche dann mit der Intrusionskurve aus der experimentellen Untersuchung abgeglichen werden kann, um das Porenraummodell zu validieren.

5 Laborversuche

5.1 Ausgangsstoffe

5.1.1 Bindemittel

α -Halbhydrat

Es wurden zwei handelsübliche α -Halbhydrate der Fa. A verwendet. Bei dem nachfolgend als α -HHW bezeichneten Halbhydrat handelte es sich um das unaufgemahlene Ausgangsprodukt für α -HH27. Chemisch waren somit keine Unterschiede zwischen beiden Halbhydraten. Sie unterschieden sich lediglich in ihrer spezifischen Oberfläche. Während das mit α -HH27 bezeichnete Halbhydrat einen Blaine-Wert von 2600-3400 cm²/g aufwies, lag der Blaine-Wert des als α -HHW bezeichneten Halbhydrates bei 1000-1100 cm²/g. Deutlich wird dies auch durch den Vergleich der REM- Aufnahmen der Partikel (Bild 18 und 19) bei gleicher Vergrößerung und dem Vergleich der Kornzusammensetzung der im Lasergranulometer bestimmten Proben (Bild 20 und 21). Die chemischen Durchschnittsanalysen der beiden α -Halbhydrate befinden sich im Anhang A 4.1.

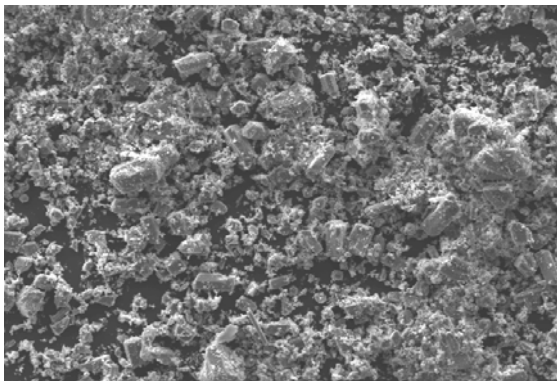


Bild 18: REM Aufnahme der Probe α -HH27; Bildbreite 578 μ m

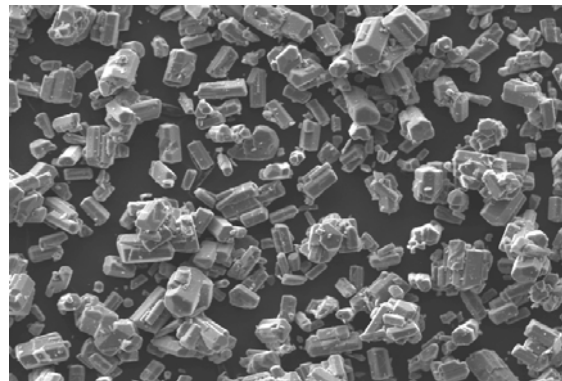


Bild 19: REM Aufnahme der Probe α -HHW; Bildbreite 578 μ m

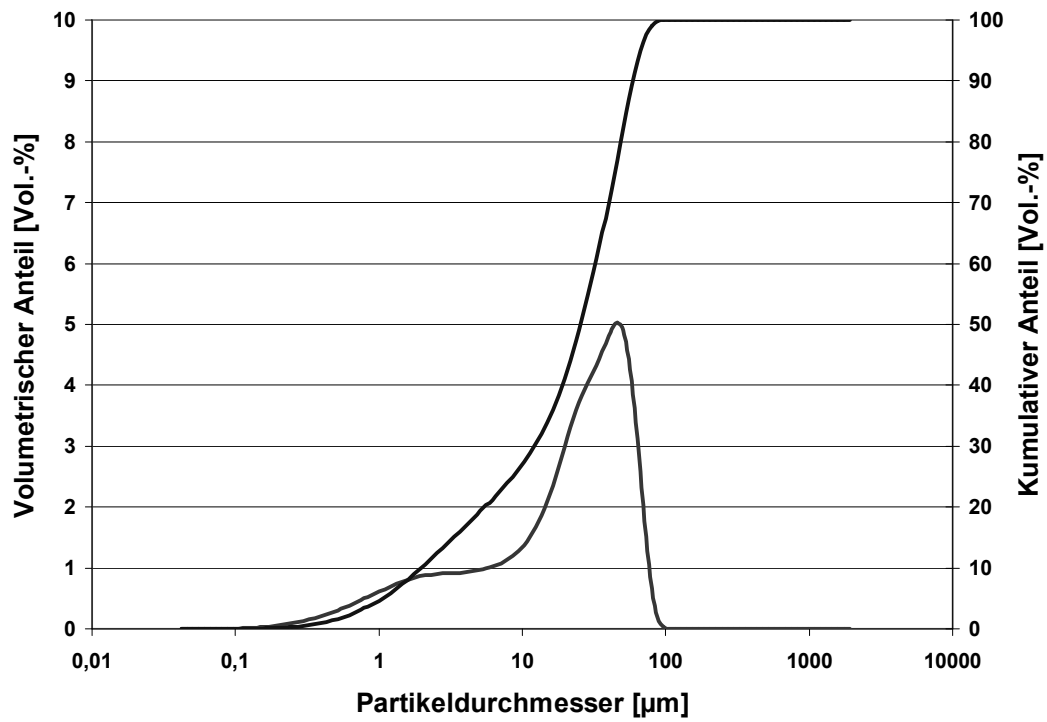


Bild 20: Kornzusammensetzung des α -HH27

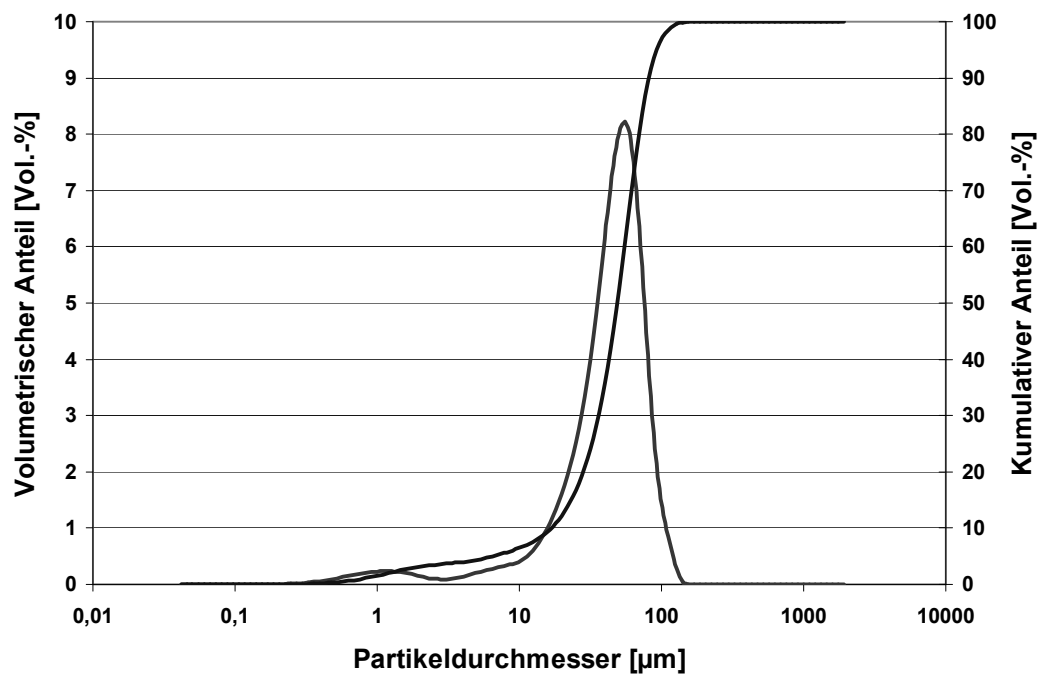


Bild 21: Kornzusammensetzung des α -HHW

β -Halbhydrat

Das verwendete β -Halbhydrat (Probenbezeichnung β -HH) war ein handelsüblicher Stuckgips der Firma C. Er war sehr feinkristallin und im Gegensatz zum α -HH zerklüftet und porös. Die Morphologie ist in Bild 22 wiedergegeben. Es zeigt die für β -HH typischen feinkristallinen Agglomerate. Bild 23 gibt das Ergebnis der lasergranulometrischen Messung wieder. Die chemische Durchschnittsanalyse befindet sich im Anhang A 4.1.

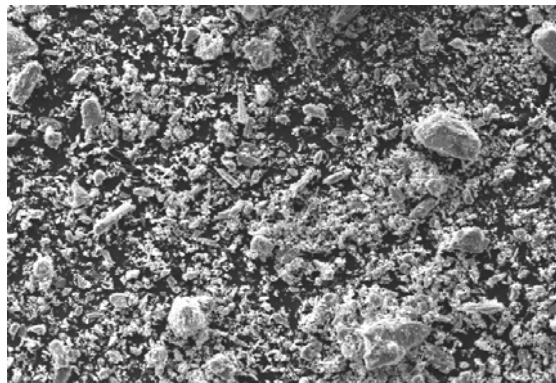


Bild 22: Morphologie des β -HH; Bildbreite 578 μm

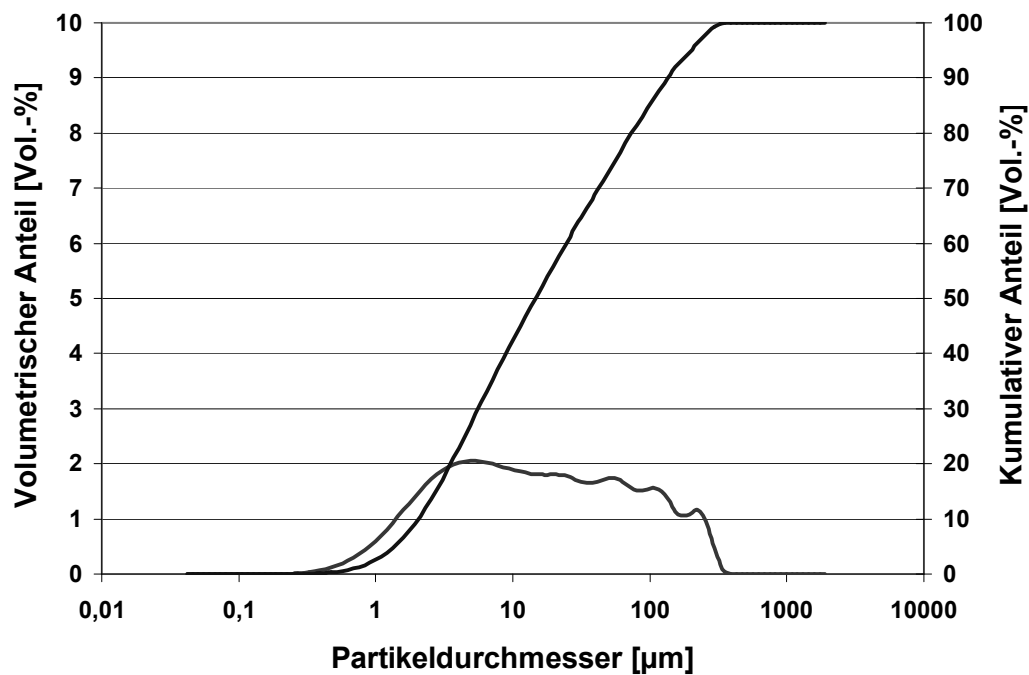


Bild 23: Kornzusammensetzung des β -HH

Anhydrit

Als Anhydrit (Probenbezeichnung A) wurde ein Produkt der Fa. A verwendet. Es handelt sich dabei um einen Anhydrit II mit einem Blaine- Wert von 4000 cm²/g. Die chemischen Analysewerte sind im Anhang A 4.1 wiedergegeben.

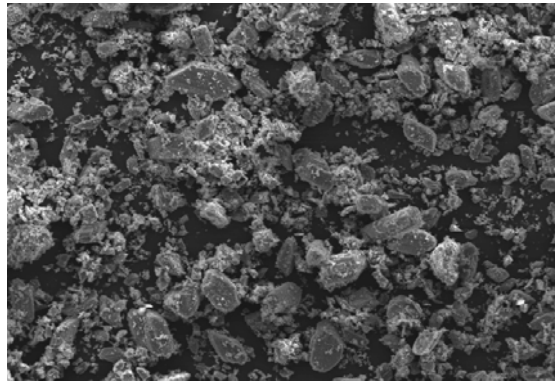


Bild 24: Morphologie des Probenmaterials A; Bildbreite 578 µm

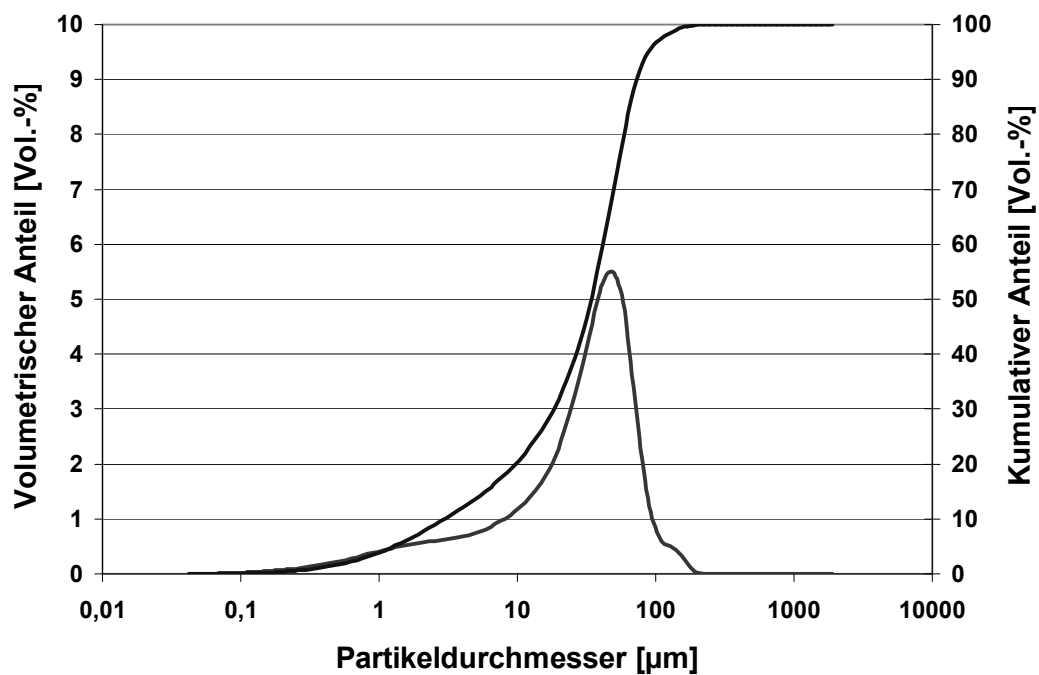


Bild 25: Kornzusammensetzung des Anhydrit

Kalk

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden vorwiegend Weißkalkhydrate (CL 80 – CL 90) nach DIN EN 459 von drei unterschiedlichen Herstellern herangezogen (siehe hierzu Tabelle A 4.1 im Anhang). Die chemischen Analysedaten sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Bild 26 gibt die Kornzusammensetzung des verwendeten CL80 wieder.

Tabelle 1: Chemische Analysedaten der verwendeten Kalkhydrate

	CL 80	CL 90	CL 80 S	CL 90 S	PC 50	PC 54
CaO	60,97	72,00	62,60	72,30	74,10	73,90
MgO	0,46	2,14	2,14	0,56	0,56	0,57
SiO ₂	13,42	1,76	8,58	0,90	0,17	0,27
Fe ₂ O ₃	1,15	0,35	1,49	0,20	0,05	0,06
Al ₂ O ₃	3,13	0,62	3,16	0,32	0,10	0,12
K ₂ O	0,47	0,12	0,75	0,04	0,01	0,01
Mn ₂ O ₃	0,13	0,04	0,04	0,04	0,02	0,03
Na ₂ O	0,10	0,02	0,16	0,02	0,01	0,01
SO ₃	0,26	0,12	0,19	0,04	0,04	0,04
CO ₂	3,69	1,14	1,18	1,03	0,63	0,51
geb. H ₂ O	14,11	20,60	17,00	22,70	23,00	23,00
Feuchte	1,89	0,98	0,79	1,00	0,42	0,57

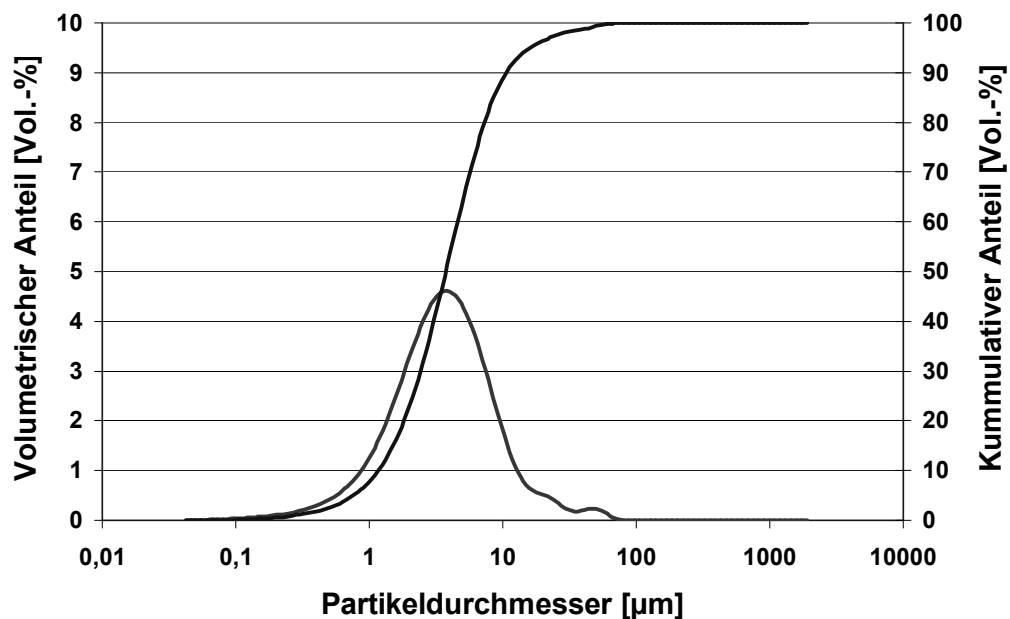


Bild 26: Korngrößenverteilung des Weißkalkhydrates CL 80

Zement

Für die Untersuchungen zur Einschätzung des Thaumasitpotentials der Instandsetzungsmörtel wurde zusätzlich ein handelsüblicher Portlandzement CEM I 52,5 R eingesetzt. Aufgrund der im Zement enthaltenen Hauptklinkerphase Tricalciumaluminat (C_3A) sollte durch den Einsatz des Zementes das Thaumasit- bzw. Ettringit- Bildungspotential erhöht werden. Die Analysedaten des verwendeten Zementes befinden sich im Anhang A.4.

5.1.2 Gesteinskörnung

Kalksteinmehl ($CaCO_3$)

Das verwendete Kalksteinmehl (Probenbezeichnung KSM) stammt von der Firma B. Die chemische Hauptkomponenten (Angaben des Herstellers) waren:

97,34 % $CaCO_3$

0,78 % $MgCO_3$

Die chemischen Analysedaten des Kalksteinmehls sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Bild 27 und 28 geben die Morphologie des verwendeten Kalksteinmehls und Bild 28 die Kornzusammensetzung wieder.

Tabelle 2: Chemische Analyse des Kalksteinmehls

	KSM
CaO	45,53
MgO	0,37
SiO ₂	0,67
Fe ₂ O ₃	0,17
Al ₂ O ₃	0,2
K ₂ O	0,03
Mn ₂ O ₃	0,02
Na ₂ O	0,02
SO ₃	0,03
CO ₂	43,37
geb. H ₂ O	0,3

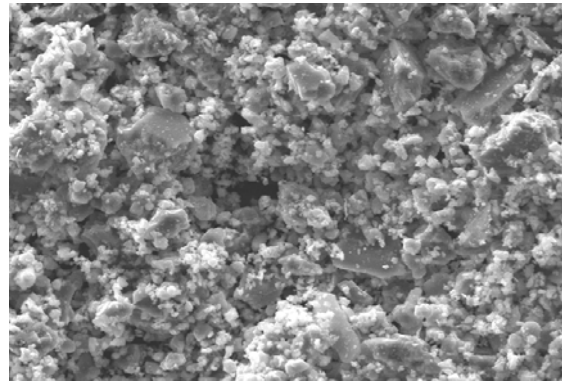
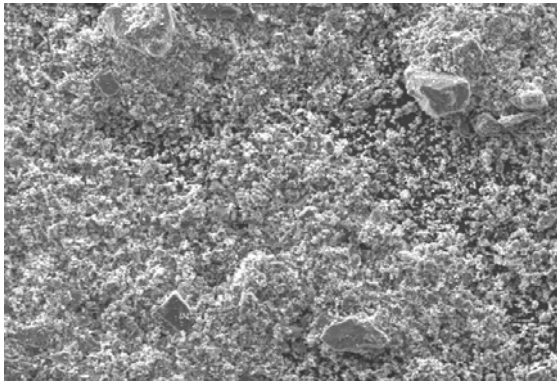


Bild 27: Kalksteinmehl, Bildbreite 578 µm **Bild 28:** Kalksteinmehl, Bildbreite 145 µm

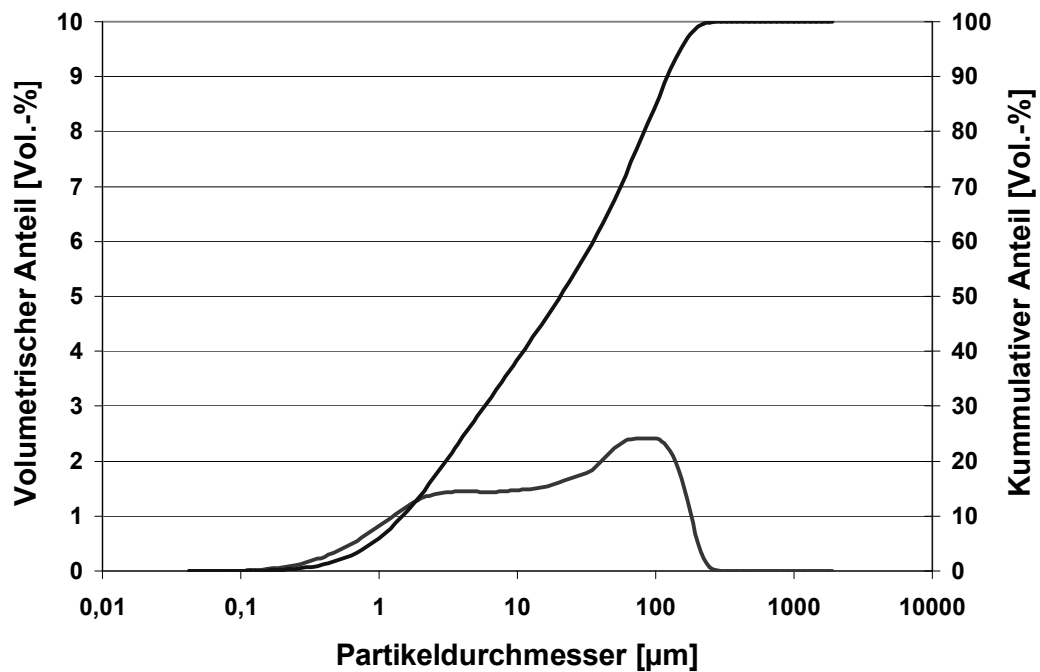


Bild 29: Kornzusammensetzung des Kalksteinmehls

Quarzsand (SiO_2)

Es wurde Quarzsand der Firma B in zwei verschiedenen Körnungen verwendet, und zwar 0 bis 0,63 mm (Probenbezeichnung QS 0,6) und 2 bis 4,5 mm (Probenbezeichnung QS 4).

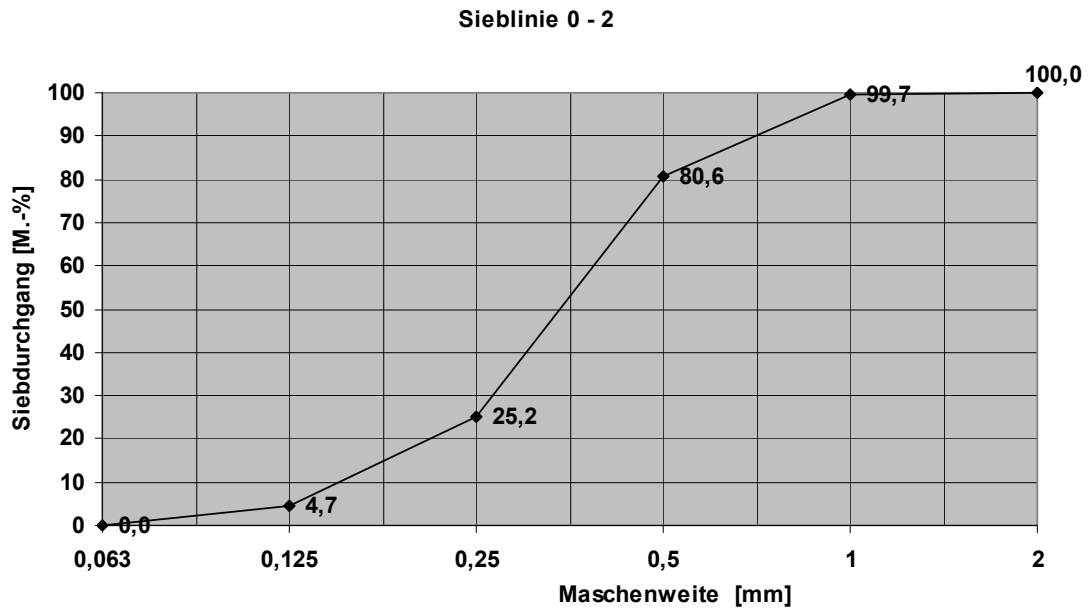


Bild 30: Sieblinie des Quarzsandes QS 0,6

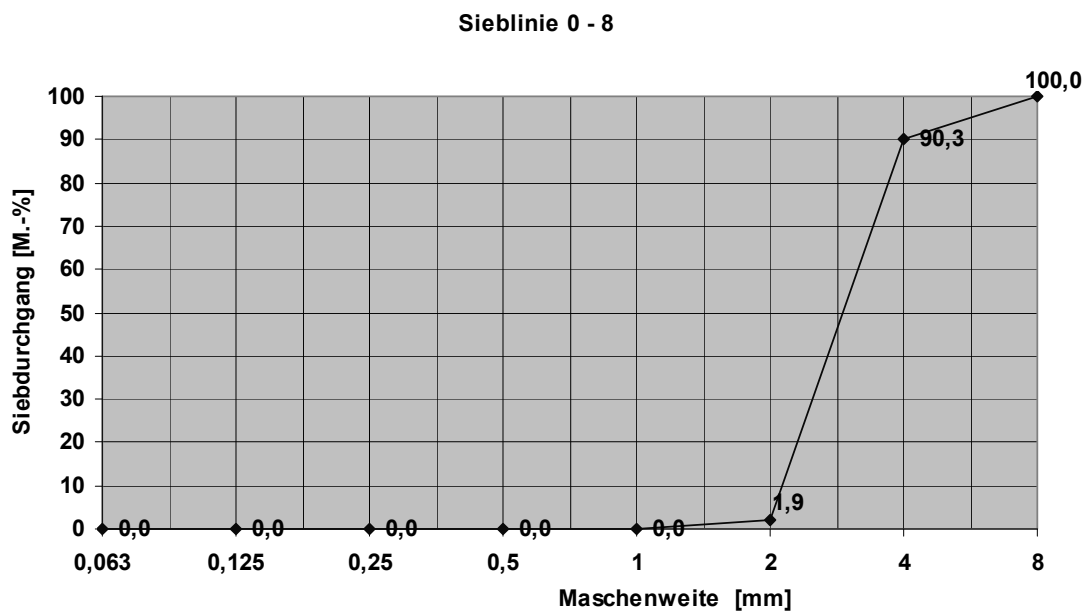


Bild 31: Sieblinie des Quarzsandes QS 4

Kalksteinbrechsand (CaCO_3)

Der verwendete Kalksteinbrechsand der Firma B war ein durch Brechen und Sieben erzeugter Sand mit einer Körnung von 0 bis 3 mm. Für die Untersuchungen wurden daraus zwei verschiedene Körnungen hergestellt, und zwar 0,5/1,8 mm (Probenbezeichnung KBS 1) und 1,2/3,0 mm (Probenbezeichnung KBS 2).

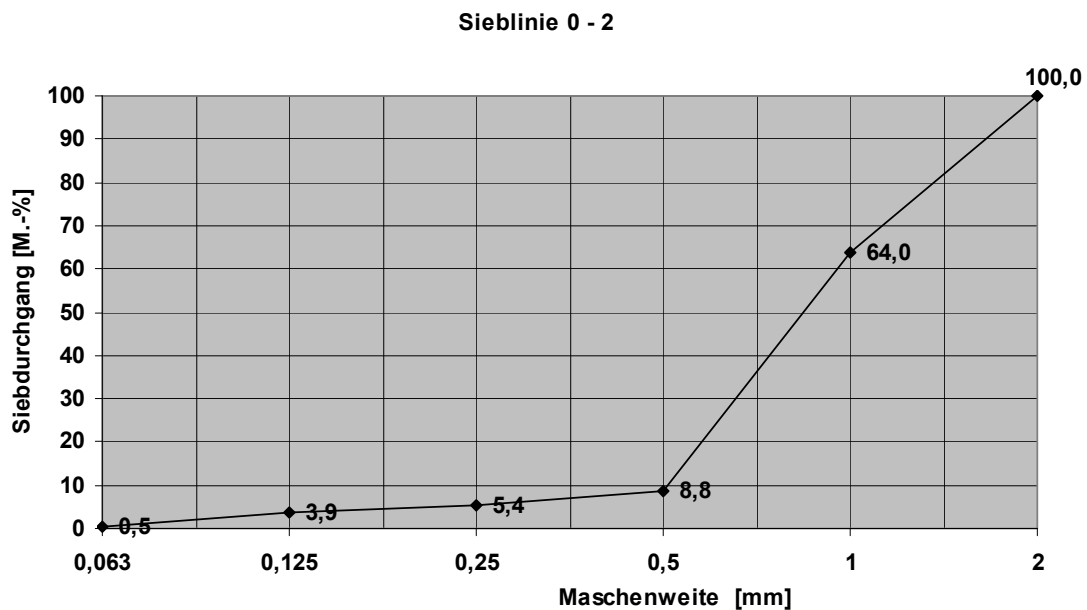


Bild 32: Sieblinie des Kalksteinbrechsandes KBS 1

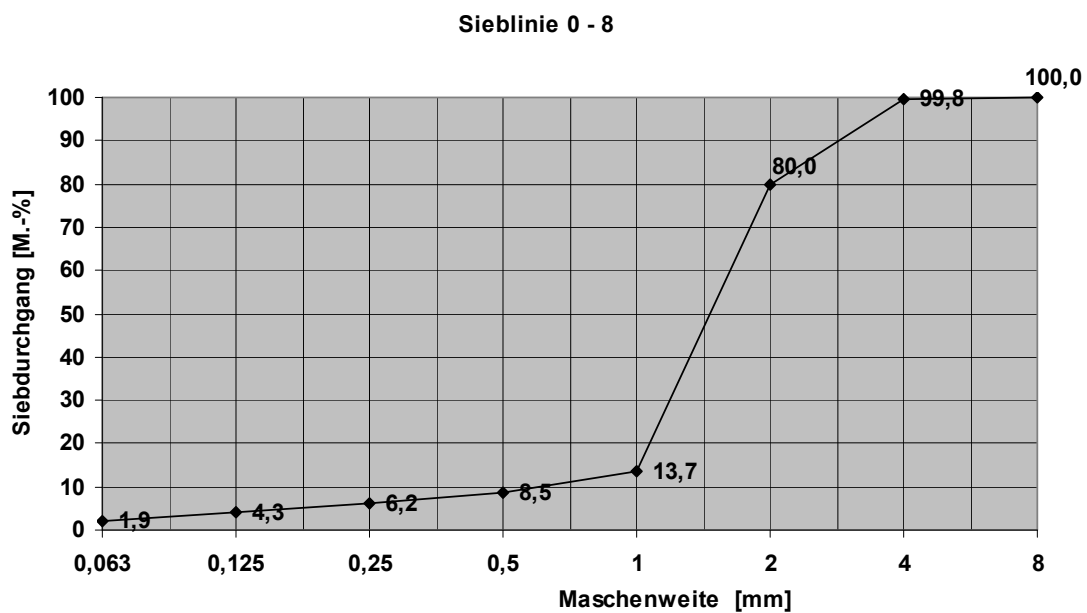


Bild 33: Sieblinie des Kalksteinbrechsandes KBS 2

Gesteinskörnung aus Anhydrit

Für Vorversuche wurde weiterhin eine Calciumsulfat-Anhydrit-Gesteinskörnung (Probenbezeichnung AN) der Firma D mit einer Körnung von 0 bis 4 mm verwendet.

5.1.3 Zusatzmittel

Weinsäure ($C_4H_6O_6$)

Weinsäure ist eine Dihydroxidcarbonsäure. Die hier verwendete L(+)-Weinsäure ist unter Normalbedingungen ein farbloser kristalliner Feststoff und wurde für die Halbhydrat-Bindemittel als Abbindeverzögerer eingesetzt. Sie lag als feines Pulver vor und wurde aus dem Chemikalienhandel als Reinsubstanz bezogen. Sie wird mit WS abgekürzt.

Kaliumsulfat (K_2SO_4)

Das verwendete reine Kaliumsulfat (K_2SO_4) war ein weißes, kristallines Pulver und wurde in Verbindung mit Anhydrit eingesetzt, um bei diesem eine Abbindebeschleunigung zu erreichen.

Methylcellulose

Methylcellulose (hier mit der Probenbezeichnung MC) wird aus dem Rohstoff Cellulose hergestellt. Sie wird verwendet, um das Wasserrückhaltevermögen der Baustoffe zu verbessern. Das zum Abbinden benötigte Wasser wird durch die Methylcellulose gebunden und während des Aushärtens langsam an das Bindemittel abgegeben. Sie wurde ebenfalls als Reinsubstanz verwendet.

5.2 Messung der Verwitterungsresistenz

Die höchste Priorität lag auf einer Beurteilung der Verwitterungsresistenz der Mörtel. Im Labor wurden sie mit dem in Kapitel 4 beschriebenen Versuchsaufbau im Klimaschrank geprüft.

5.2.1 Mörtelmischungen

Die Verwitterungsresistenz wurde an den in Tabelle 3 angegebenen Mörtelmischungen untersucht.

Tabelle 3: Mischungen der Versuchsreihe I

	Probebezeichnung	20/50/30 a	20/50/30 b	20/50/30 c	20/50/30 d	20/50/30 e	A80/20 a	A80/20 b	A80/20 c	A80/20 d	A80/20 e
	Bindemittel : Zuschlag		5:1	2:1	4:1	2:1		5:1	2:1	4:1	2:1
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	20	20	20	20	20					
	β -Halbydrat [M.-%]	50	50	50	50	50					
	Anhydrit [M.-%]						80	80	80	80	80
	Kalkhydrat [M.-%]	30	30	30	30	30	20	20	20	20	20
Gesteinsk. (100%)	KSM [M.-%]		100	50		50		100	50		50
	KBS 1 [M.-%]			25					25		
	KBS 2 [M.-%]			25					25		
	AN [M.-%]				100	50				100	50
Additiv	Weinsäure* ¹	X	X	X	X	X	X				
	Kaliumsulfat * ²							X	X	X	X
	Wasser/Bindemittel-Verhältnis										
	CL90	0,50	0,55	0,58	0,54	0,60	0,36	0,39	0,43	0,33	0,43
	CL80	0,49	0,54	0,57	0,53	0,58	0,34	0,37	0,39	0,36	0,40

*¹ 1 % Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 % Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

Grundlage bildeten die in Kapitel 3.4 genannten Mörtel. Der Bindemittelanteil dieser Mischungen wurde mit unterschiedlichen Kalkhydraten, dem CL 80 und dem CL 90, variiert. Variiert wurde ebenfalls das α -Halbydrat. Es wurden beide α -Halbydrate (α -HH27 und α -HHW) eingesetzt. Die Halbydrate wurden mit 0,1 M.-% Weinsäure verzögert und der Anhydrit mit 0,75 M.-% Kaliumsulfat angeregt. Auch die Art und die Verteilung der Gesteinskörnung wurde in unterschiedlichen Variationen kombiniert. So wurde neben einer reinen Bindemittelmischung auch Mörtel mit Kalksteinmehl,

Kalkbrechsand und Anhydritbrechsand in den in Tabelle 3 angegebenen Mengenverhältnissen untersucht.

5.2.2 Ergebnisse

Um zu beurteilen, nach welcher Berechnungszeit eine vollständige Durchfeuchtung der Prismen erfolgte, wurde in Vorversuchen die Masseänderung der Probekörper alle 5 Minuten gravimetrisch ermittelt. Nach etwa 25 Minuten (siehe hierzu Bild 34) waren die Prismen vollständig durchfeuchtet. Die Berechnungszeit für die weiteren Versuche wurde deshalb auf 30 Minuten festgelegt.

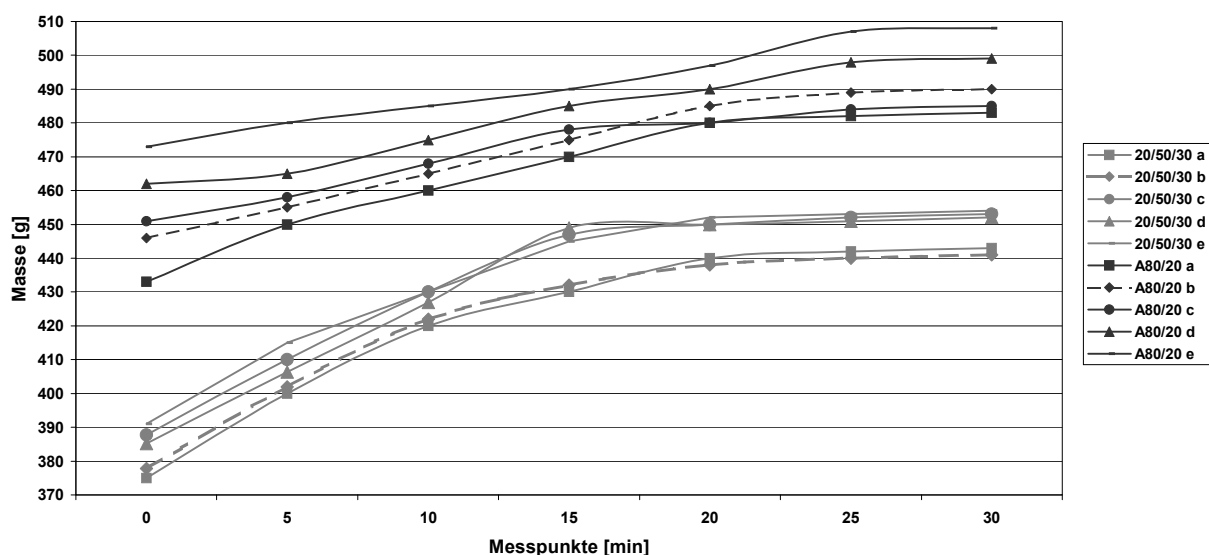


Bild 34: Masseänderung [g] in Abhängigkeit von der Berechnungszeit [min]

10 mm dicke Mörtelstreifen (Kapitel 4.7) erreichten wieder ihre Ausgleichsfeuchte nach einer Trockenzeit von 5,5 Stunden. Für alle weiteren Untersuchungen an den bewitterten Prismen wurden deshalb die obersten 10 mm der berechneten Fläche begutachtet.

Alle Mischungen aus Tabelle 3 zeigten im Verwitterungsversuch einen sehr geringen Masseverlust von maximal 1,8 M.-% (Mischung A80/20 e) bezogen auf das Ausgangsgewicht. Die Ergebnisse sind im Anhang in den Diagrammen A 5.1.1 bis

A 5.1.6 wieder gegeben. Die Mischungen hielten damit alle dem Bewitterungsangriff stand.

Dennoch wurde α -HHW in den weiteren Versuchen nicht mehr eingesetzt, da der damit hergestellte Mörtel bei der Verarbeitung stark blutete, was auf die geringe spezifische Oberfläche von nur 1000 cm²/g zurückzuführen war (vergl. hierzu Bilder 18/19 und 20/21).

Auch auf das Kalkhydrat CL90 wurde im Weiteren verzichtet und stattdessen der CL80 weiter verwendet. Für eine ausreichende Verwitterungsresistenz im Frühstadium des Gefügebraufbaus der Mörtel sollten geringe Mengen an hydraulischen Komponenten in den Mischungen vorhanden sein.

Im weiteren Verlauf wurde als Gesteinskörnung eine Mischung aus Kalksteinmehl und Kalksteinbrechsand gewählt (Mörtelzusammensetzung siehe Tabelle 4). In den Vorversuchen I wurde noch ein Anhydritzuschlag als Gesteinskörnung eingesetzt. Da aber die Gefahr besteht, dass dieser bei Zutritt von Feuchtigkeit noch über Jahre hinweg unkontrolliert abbinden und ggf. quellen kann, wurde im weiteren Verlauf der Untersuchungen auch auf Anhydritzuschlag verzichtet.

5.2.3 Mörtelmischungen

Nach den Vorversuchen wurden die in Tabelle 4 angegebenen Mischungen weiter untersucht. Grundlage waren die Mischungen 20/50/30c und A80/20c aus Tabelle 3. Das Verhältnis von α -Halbhydrat zu β -Halbhydrat wurde weiter abgestuft, so dass sich zusätzlich die Mischungen 40/30/30, 60/10/30 und 80/0/20 ergaben. Hinzugekommen war ein Mörtel mit 100 M.-% des α -Halbhydrat (α -HH27) als Bindemittel.

Tabelle 4: Mischungen der Vorversuche II

Probebezeichnung		20/50/30	40/30/30	60/10/30	80/0/20	A80/20	100/0/0
Bindemittel : Zuschlag		2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	20	40	60	80		100
	β -Halbhydrat [M.-%]	50	30	10			
	Anhydrit [M.-%]					80	
	CL80 [M.-%]	30	30	30	20	20	
Gesteinsk.	KSM [M.-%]	50	50	50	50	50	50
	QS 0,6 [M.-%]						
	KBS 1 [M.-%]	25	25	25	25	25	25
	KBS 2 [M.-%]	25	25	25	25	25	25
	QS 4 [M.-%]						
Additiv	Weinsäure* ¹	X	X	X	X		X
	Kaliumsulfat * ²					X	
Wasser/Bindemittel-Verhältnis		0,51	0,48	0,40	0,34	0,38	0,30

*¹ 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

Auch die in Tabelle 4 angegebenen Mischungen wurden mit 0,1 M.-% Weinsäure bezogen auf den Halbhydratanteil verzögert und der Anhydrit mit 0,75 M.-% Kaliumsulfat angeregt.

5.2.4 Ergebnisse

Nach 250 Zyklen bzw. nach einer Bewitterungszeit von 70 Tagen wurden deutliche Unterschiede im Verwitterungsverhalten der Mörtel festgestellt. Bild 35 zeigt die Masseänderung in Prozent bezogen auf 100 % der Ausgangsmasse.

Bei den Mischungen 20/50/30, 40/30/30, 60/10/30, 80/0/20 und A80/20 zeigte sich, dass optisch und gravimetrisch kein Masseverlust auftrat. Diese Mischungen wiesen demnach eine „gute“ Verwitterungsresistenz auf und wurden als Grundlage für die weiteren Optimierungsschritte verwendet. Die Mischung 100/0/0 (100 % α -HH27 und ohne Kalkhydrat) hingegen zeigte einen deutlichen Masseverlust von ca. 40%. Diese Mischung wurde daher verworfen. Das Ergebnis des Bewitterungsversuches bestätigte die Annahme, dass Kalkhydrat für die Verwitterungsresistenz der Mörtel eine entscheidende Rolle spielen muss. Bild 35 zeigt einen Vergleich je eines Prismas aus der kalkhydratfreien Mischung 100/0/0 und der Mischung 20/50/30 mit 30 M.-% Kalkhydrat.

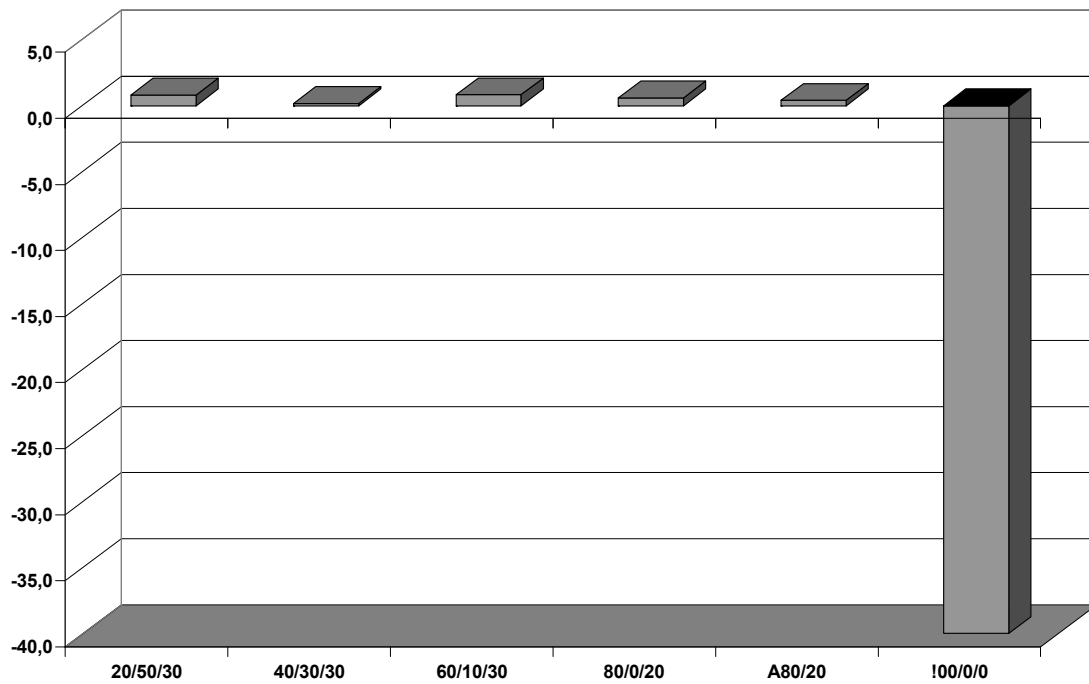


Bild 35: Veränderung der Masse in [%] bezogen auf die Ausgangsmasse nach Bewitterung im Labor

Bei der Probe ohne Kalkhydrat ist das Bindemittel ausgewaschen und die Gesteinskörnung tritt deutlich hervor. Im Gegensatz dazu zeigt die Oberfläche der Probe 20/50/30 keine Anlösungen und Auswaschungen.

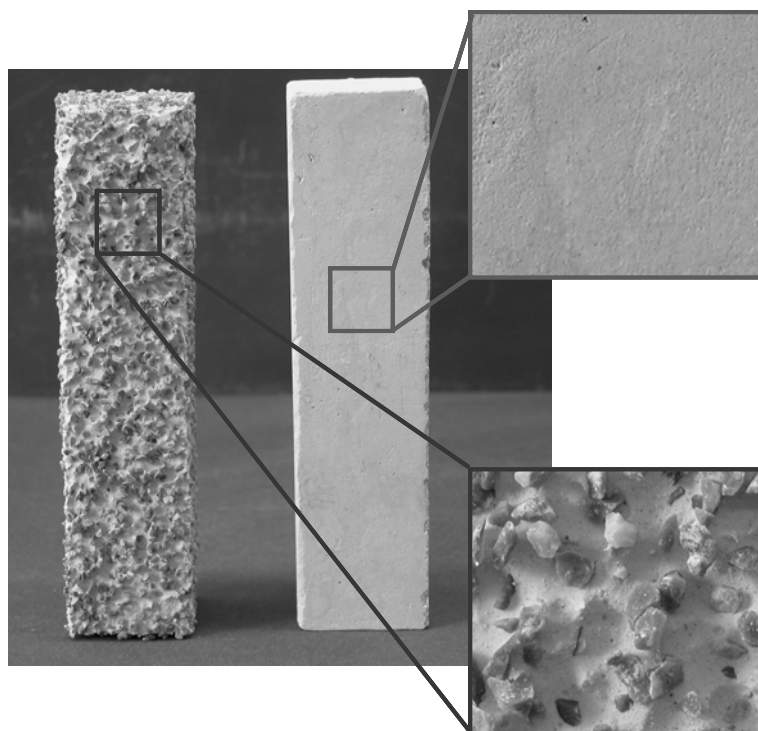


Bild 36: Probekörper nach Bewitterungsversuchen, 90 Tage = 360 Zyklen

Bild 37 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Probe 80/0/20 wiedergegeben. Deutlich sind Calciumsulfat und Calciumcarbonat des Bindemittels zu erkennen.

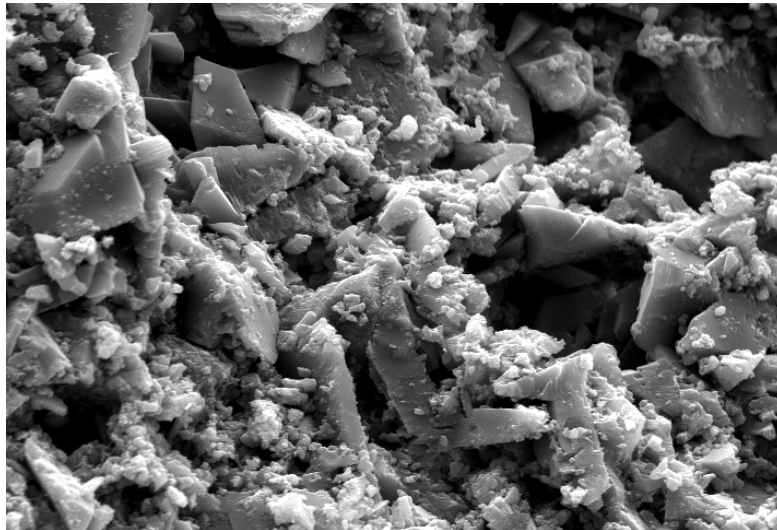


Bild 37: REM-Aufnahme der Probe 80/0/20, Bildbreite 72,5 µm

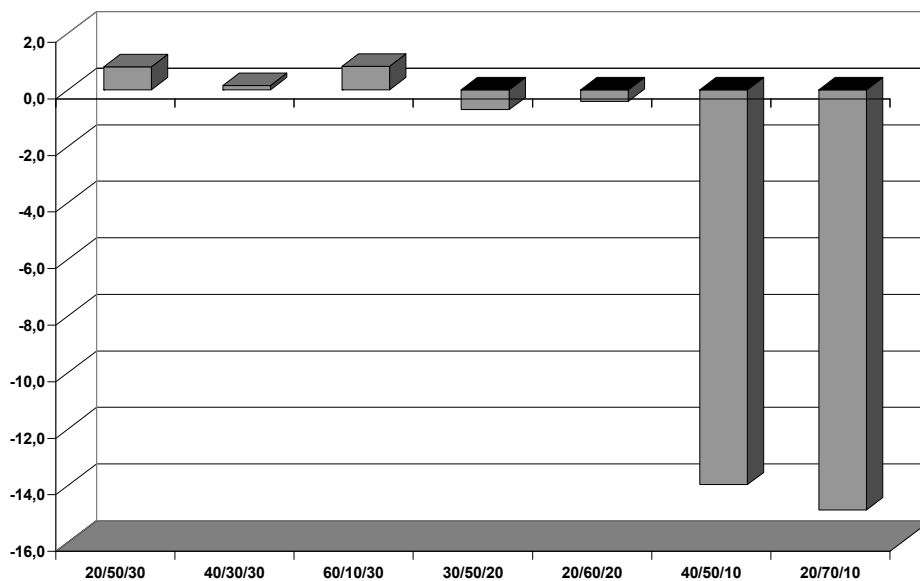


Bild 38: Veränderung der Masse in [%] nach Verwitterungsversuchen im Labor bezogen auf die Ausgangsmasse

Je mehr Kalkhydrat im Bindemittelanteil enthalten ist, desto höher ist erfahrungsgemäß die Verwitterungsresistenz der Mörtel. Der mögliche Gehalt wird allerdings vom Schwindverhalten beschränkt. Untersuchungen in [10] haben gezeigt, dass sich dort ab einem Gehalt von 30 M.-% am Bindemittel die Schwindverformung

überproportional auf -2 bis -4 mm/m erhöhte. Die eigenen Untersuchungen ergaben demgegenüber, dass ein Gehalt < 20 M.-% das Verwitterungsverhalten der Mörtel negativ beeinflusst. Wurde der Anteil an Kalkhydrat auf 10 M.-% verringert, so ergaben sich nach 250 Zyklen ein Masseverluste von im Mittel 14 %, während bei einem Gehalt von 20 M.-% praktisch kein Masseverlust (ca. 0,5 %) auftrat (siehe Bild 38).

Betrachtet man sich die Porenradienverteilung der Mischungen vor und nach der Bewitterung (Bild 39), so fällt auf, dass die Gesamtporosität abnahm. Nur Mischung 20/50/30 bildete eine Ausnahme, die Gesamtporosität blieb weitgehend gleich. Bei allen Proben nahm die Kapillarporosität ab und die Gelporosität zu. Beide Effekte lassen auf eine Verdichtung des Gefüges schließen. Durch den Einfluss der Feuchtigkeit werden Calciumsulfat Kristalle partiell angelöst und durch kapillare Kräfte nach innen transportiert, wo es zu einer erneuten Auskristallisation in den Poren kommt. Dadurch nimmt der Gehalt an Kapillarporen ab und der der Gelporen steigt.

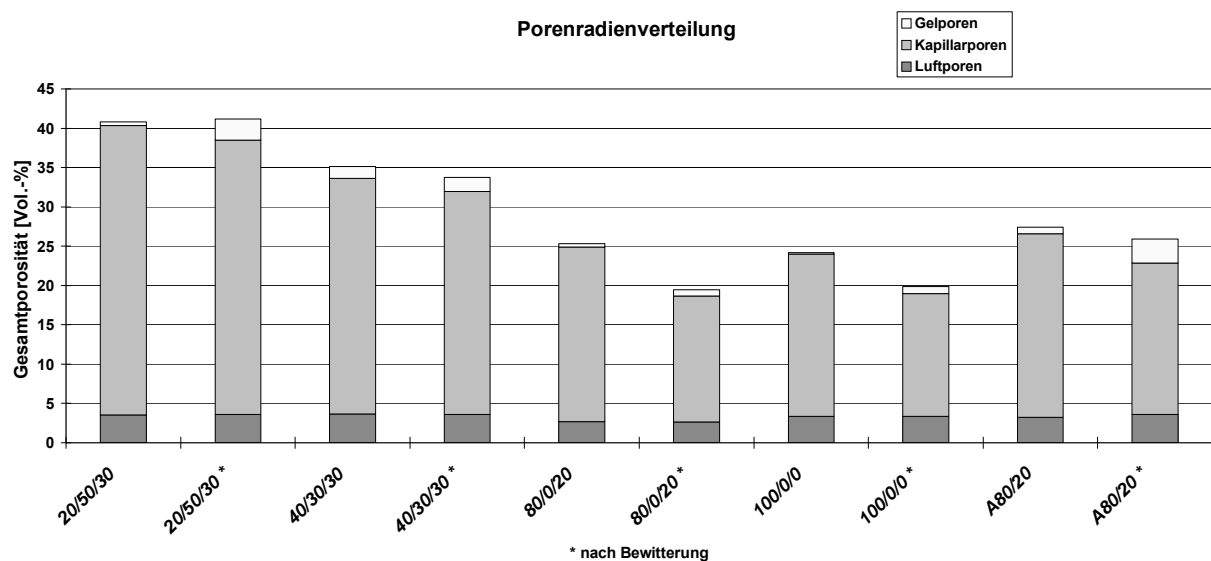


Bild 39: Porenradienverteilung der Mörtelproben vor und nach der Bewitterung

In Bild 40 sind neu gebildete Calciumsulfatkristalle in einer Pore der bewitterten Probe 40/30/30 zu erkennen. Auch an historischen Mörtelproben konnte dieses erneute Auskristallisieren in einer Pore unter dem Rasterelektronenmikroskop beobachtet werden (vergl. hierzu Bild 41).

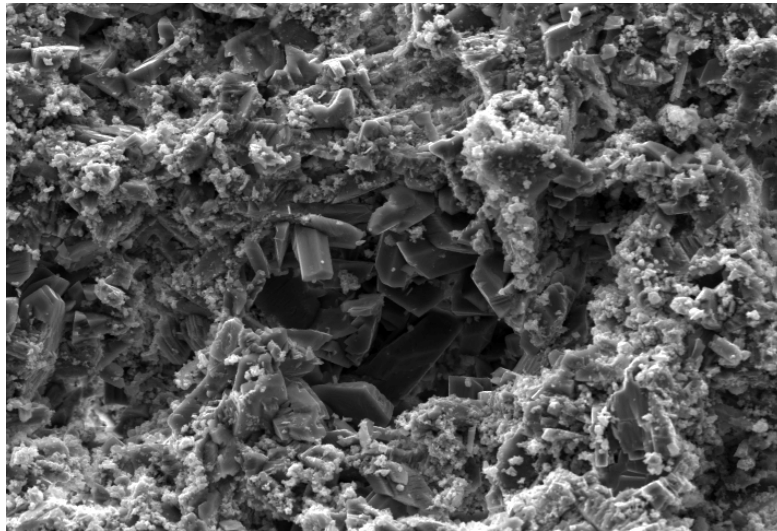


Bild 40: REM-Aufnahme der Probe 40/30/30 nach der Bewitterung,
Bildbreite 290 µm

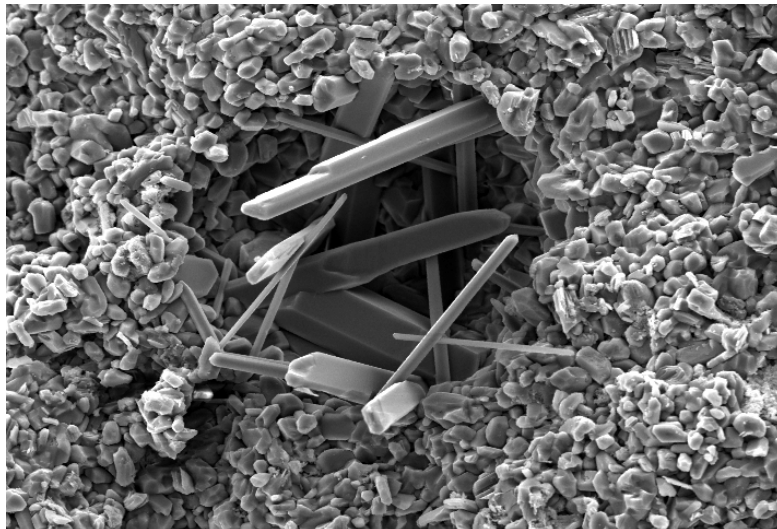


Bild 41: Kristallneubildungen in einer Pore eines historischen Mörtels,
Bildbreite: 290 µm

5.2.5 Festmörteleigenschaften

Zusätzlich zur Verwitterungsresistenz wurde untersucht, wie sich eine Variation des Verhältnisses von α -HH zu β -HH auf die Festmörteleigenschaften - die Druckfestigkeit, die Gesamtporosität und den Wasseraufnahmekoeffizienten - auswirkt. Aus diesem Grund wurden ergänzend zu den Mischungen aus Tabelle 4 Zwischenmischungen hergestellt. Die Mischungen und die zugehörigen Wasser-/Bindemittel-Werte (w/b-Wert) sind in Tabelle A 5.1.1 im Anhang wieder gegeben. Der Gehalt an Kalkhydrat und der Gesteinskörnung in den Mischungen blieb konstant.

In Bild 42 sind die Festigkeiten der Gesamtporosität und dem kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten (WAK) gegenüber gestellt. Die Druckfestigkeit nahm mit steigendem α -Halbhydratanteil zu; der Wasseraufnahmekoeffizient und die Gesamtporosität nahmen dagegen mit steigendem α -Halbhydratanteil im Bindemittel ab, weil der w/b-Wert kontinuierlich von 0,55 (0/70/30) auf 0,36 (70/0/30) absank. Dies lässt sich dadurch begründen, dass α -HH bei gleicher Verarbeitbarkeit einen geringeren Wasseranspruch hat als β -HH.

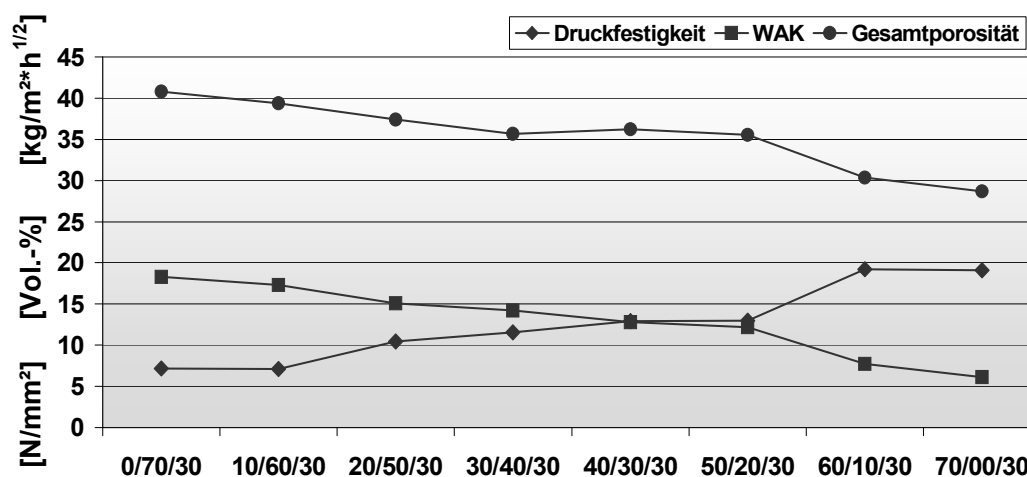


Bild 42: Vergleich der Festigkeit mit der Gesamtporosität und dem Wasseraufnahmekoeffizienten

Mit fallender Gesamtporosität verdichtete sich das Gefüge und die Festigkeit stieg an. Im gleichen Maße hing auch der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient mit der

Porosität zusammen. Sank die Porosität, desto niedriger war auch der Wasseraufnahmekoeffizient.

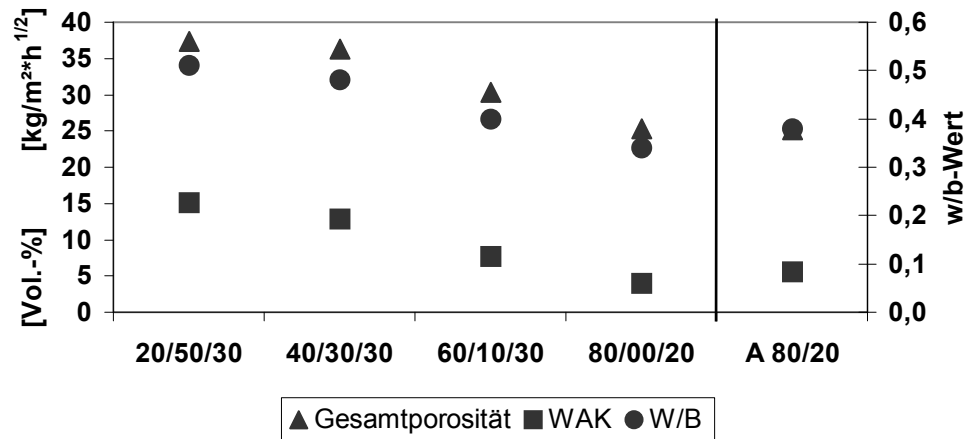


Bild 43: Vergleich der Gesamtporosität mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten in Abhängigkeit vom w/b-Wertes (Mischungen nach Tabelle 4)

Der Zusammenhang zwischen steigender Festigkeit zu fallender Porosität wird anhand des Bildes 43 nochmals verdeutlicht. Dort ist das Verhältnis zwischen der Gesamtporosität und dem w/b-Wertes wieder gegeben. Mit steigendem Anteil an α -HH in den Mischungen sank der Wasseranspruch. Bei gleich bleibendem Ausbreitmaß verringerte sich dadurch der w/b-Wert von 0,51 auf 0,34 (siehe Tabelle 4).

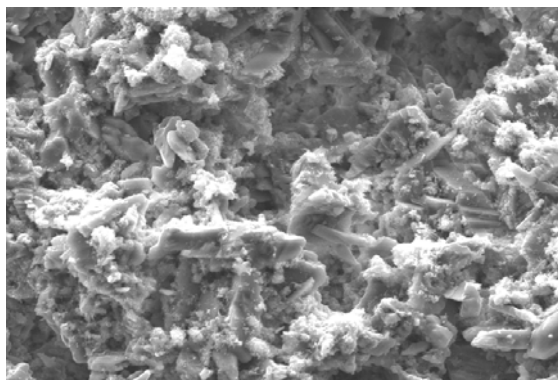


Bild 44: REM Aufnahme der Probe (20/50/30), Bildbreite 145 µm

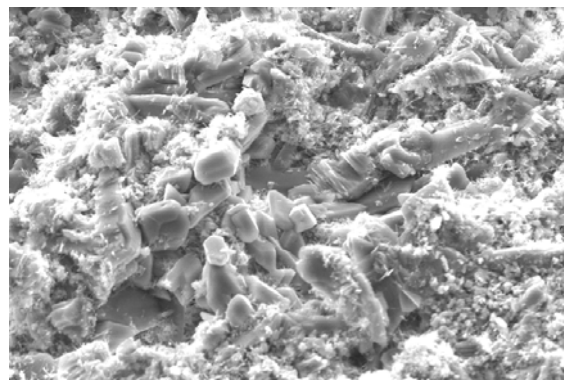


Bild 45: REM Aufnahme der Probe (40/30/30), Bildbreite 145 µm

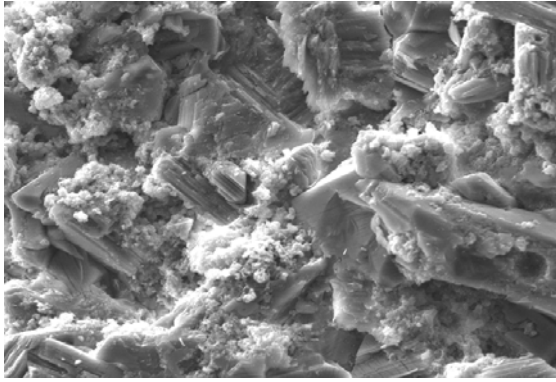


Bild 46: REM Aufnahme der Probe A(80/20), Bildbreite 145 μm

Unterschiede in der Gefügestruktur zwischen den Halbhydratmischungen sind augenscheinlich nicht erkennbar. Bei den in den Bildern 44 und 45 dargestellten Proben (20/50/30) und (40/30/30) sind die langprismatischen Gipskristalle, die von Calciumcarbonat umgeben sind, gut zu erkennen. Ein Unterschied in der Gefügestruktur bestand allerdings zwischen den Halbhydratproben und der Mörtelmischung aus Anhydrit (Bild 46). Bei derselben Vergrößerung wird deutlich, dass Anhydrit gröbere Kristalle ausbildet als die Mischungen aus α -HH und β -HH.

Alle Mischungen entsprechend Tabelle 4 waren zu diesem Zeitpunkt der Untersuchungen zwar bezüglich des Bewitterungsversuches im Labor verwitterungsresistent, aber für die Anwendung in der Praxis trotz des gleichen Ausbreitmaßes bei weitem noch nicht gut verarbeitbar. Das Ausbreitmaß konnte nicht alleine als Kriterium zur Bewertung der Verarbeitbarkeit herangezogen werden. Es mussten noch weitere Kriterien wie die Kellengängigkeit, die Klebrigkeit an der Kelle und am Stein untersucht werden.

5.3 Optimierung der Sieblinie

5.3.1 Mörtelmischungen

Das Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnis der Mörtel lag nach Abschluss der vorstehend beschriebenen Teilversuche bei allen Mischungen bei 2:1 (siehe Tabelle 4). Sie waren damit sehr bindemittelreich. Das führte dazu, dass die Mörtel bei der Verarbeitung an der Kelle und am Stein klebten. Dadurch wiesen diese Mörtel im

erhärteten Zustand z. T. Flankenabrisse und feine Haarrisse auf, die es im Weiteren zu vermeiden galt.

Im Labor wurde deshalb an den in Tabelle 4 angegebenen Mischungen die Sieblinie und das Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnis in 2 Schritten geändert, um sie danach unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 angegebenen Bewertungskriterien hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit zu beurteilen. Es wurde dabei im Ausschlussverfahren vorgegangen. Eine Mischung wurde angemischt und von Anwendungstechnikern bewertet. War das Ergebnis positiv, so wurde nicht weiter optimiert. Exemplarisch sind in Tabelle 5 anhand der Mischung (20/50/30) die Zwischenmischungen bis zum Erreichen der optimal verarbeitbaren Mischung angegeben. Die weiteren Mörtelmischungen befinden sich im Anhang in den Tabellen A 5.2.1 bis A 5.2. Die Mischungszusammensetzungen für alle Mischungen sind in Tabelle 7 dargestellt, die Ergebnisse der Bewertungen sind exemplarisch für die Mischung (20/50/30) in Tabelle 6 wieder gegeben. Für die weiteren Mischungen befinden sich die Ergebnisse im Anhang in den Tabelle A 5.2.3 bis A 5.2.4.

Tabelle 5: Zwischenmischungen der Mischung (20/50/30)

Probebezeichnung		20/50/30	20/50/30-1	20/50/30-2	K 20/50/30
Bindemittel : Zuschlag		2:1	1:1	1:4	1:4
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	20	20	20	20
	β -Halbhydrat [M.-%]	50	50	50	50
	Anhydrit [M.-%]				
	Kalkhydrat	30	30	30	30
Gesteinsk. (100%)	KSM [M.-%]	50	15,00	3,80	3,75
	QS 0,6 [M.-%]				15,75
	KBS 1 [M.-%]	25	17,60	31,45	60,00
	KBS 2 [M.-%]	25	52,00	59,75	15,50
	QS 4 [M.-%]		15,40	5,00	5,00
Additiv	Weinsäure* ¹	X	X	X	X
	Kaliumsulfat * ²				
Wasser/Bindemittel-Verhältnis		0,51	0,61	0,78	0,93

*¹ 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

Tabelle 6: Ergebnis der Bewertung für die Mischung (20/50/30)

Probebezeichnung	20/50/30	20/50/30-1	20/50/30-2	K 20/50/30
Anmischbarkeit	+	+	+	+
Kellengängigkeit	-	+	+	+
Verarbeitbarkeit	-	+	+	+
Fugenglattstrich	-	++	+	+
Klebrigkeit Kelle	--	o	+	+
Klebrigkeit Stein	--	o	+	+
Flankenhaftung	o	+	+	+
Rissbildung	-	+	+	++
offene Zeit	45 min	45 min	45 min	45 min

Allen Mischungen wurde zusätzlich Quarzsand in zwei verschiedenen Körnungen zugegeben (vergleiche hierzu Tabelle 5 und 7). Der Anteil an Kalksteinmehl verringerte sich dadurch von 50 auf 3,75 M.-% (Tabelle 7). Den größten Anteil an der Gesteinskörnung hatte nun der Kalkbrechsand (KBS 1) mit 60 M.-%. Das Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnis änderte sich ebenfalls, von 2:1 auf 1:4; 1:3,5 oder 1:2, je nach Mischung unterschiedlich. In welchem Maße sich die Sieblinie änderte ist anhand der Mischung (20/50/30) im Bild 47 dargestellt. Die Bezeichnung K (20/50/30) steht für die Sieblinie nach der Optimierung. Die Sieblinien der weiteren Mischungen und der Zwischenmischungen befindet sich im Anhang in den Bildern A 5.2.1 bis A 5.2.3.

Tabelle 7: Mischungen nach Optimierung der Sieblinie

Probebezeichnung		K 20/50/30	K 40/30/30	K 60/10/30	K 80/0/20	K A80/20
Bindemittel : Zuschlag		1:4	1:4	1:4	1:3,5	1:2
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	20	40	60	80	
	β -Halbydrat [M.-%]	50	30	10		
	Anhydrit [M.-%]					80
	Kalkhydrat	30	30	30	20	20
Gesteinsk. (100%)	KSM [M.-%]	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
	QS 0,6 [M.-%]	15,75	15,75	15,75	15,75	15,75
	KBS 1 [M.-%]	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
	KBS 2 [M.-%]	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50
	QS 4 [M.-%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Additiv	Weinsäure* ¹	X	X	X	X	
	Kaliumsulfat * ²					X
Wasser/Bindemittel-Verhältnis		0,93	0,83	0,78	0,63	0,52

*¹ 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

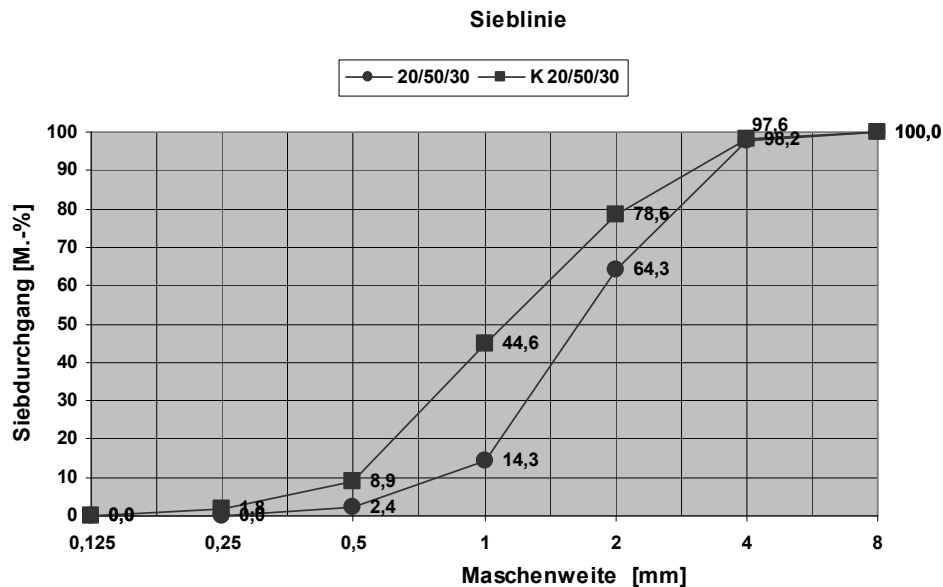


Bild 47: Sieblinie der Mischungen (20/50/30) und K(20/50/30)

5.3.2 Ergebnisse

Durch die Änderung der Sieblinie und des Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnisses änderten sich auch die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Mörtel. Durch die Änderung des Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnisses von (2:1) auf (1:4), (1:3,5) und (1:2) verringerten sich die festigkeitsbildenden Bindemittelanteile in den Mischungen. In Bild 48 sind die Gesamtporosität, die 28 Tage Druckfestigkeit und der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient gegenüber gestellt. Die deutlichste Änderung lässt sich an der 28 Tage Druckfestigkeit (siehe Bild 49) erkennen. Der Trend, dass sich mit steigendem Anteil an α -HH in der Bindemittelmischung die Festigkeiten erhöhen, lässt sich auch hier ablesen. Der w/b-Wert wird aufgrund des kleineren Wasseranspruches kleiner. Vergleiche hierzu die Tabelle 5 und die Tabellen A 5.2.1 und A 5.2.2 im Anhang.

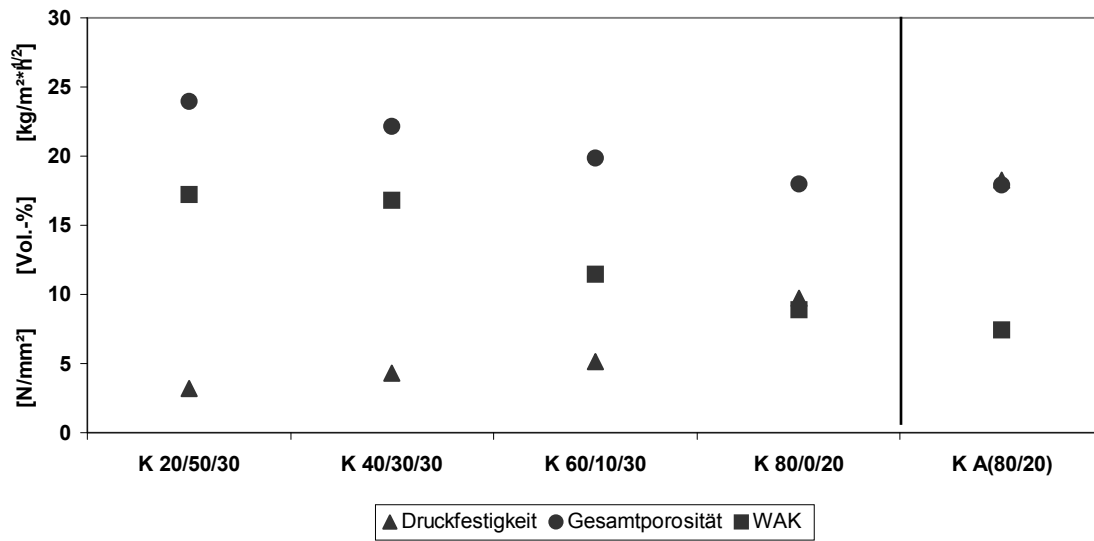


Bild 48: Vergleich der Gesamtporosität mit der Festigkeit und der kapillaren Wasseraufnahme ausgewählter Mischungen

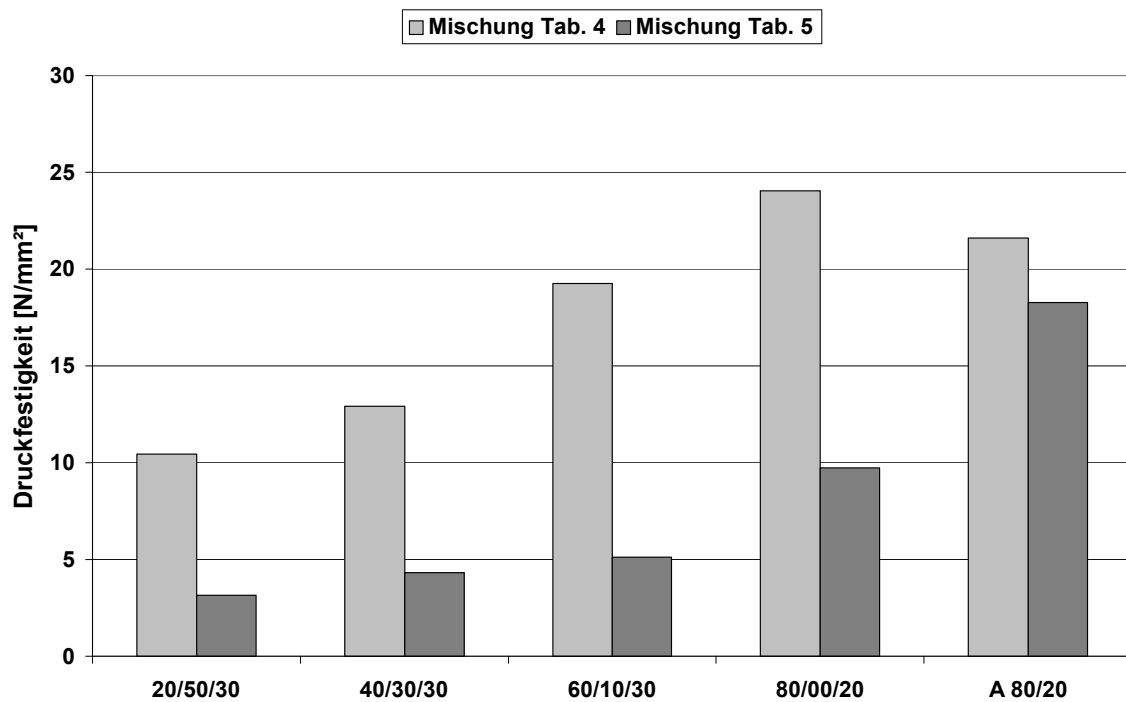


Bild 49: Vergleich der 28 Tage Druckfestigkeit der Mischungen vor und nach der Optimierung der Sieblinie

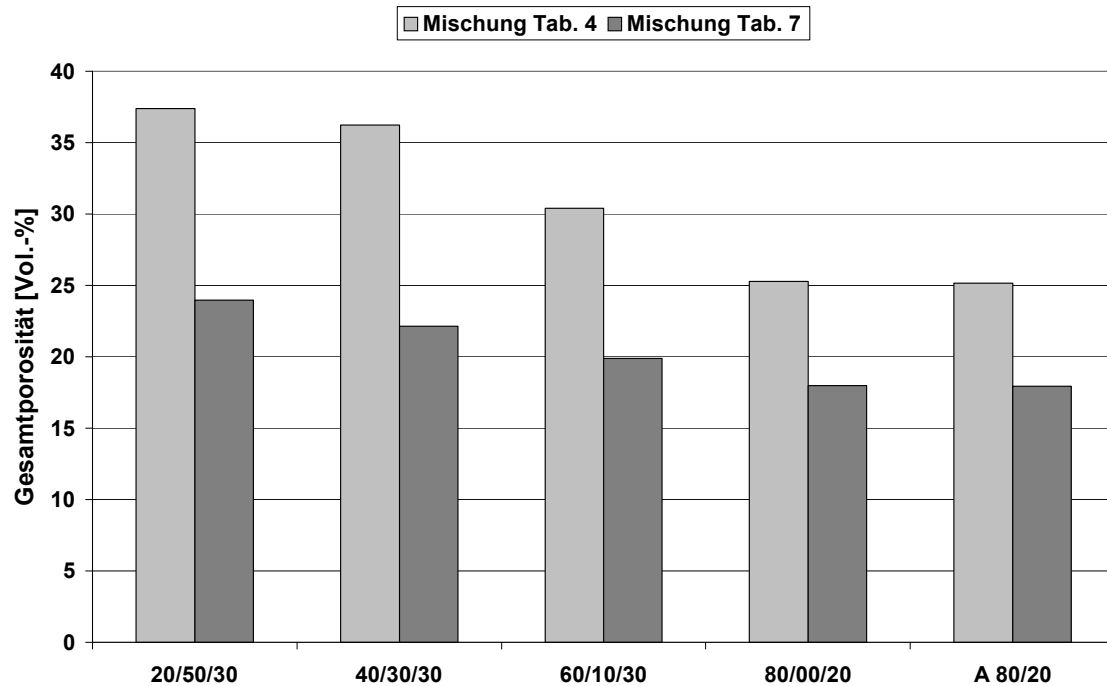


Bild 50: Vergleich der Gesamtporosität der Mischungen vor und nach der Optimierung der Sieblinie

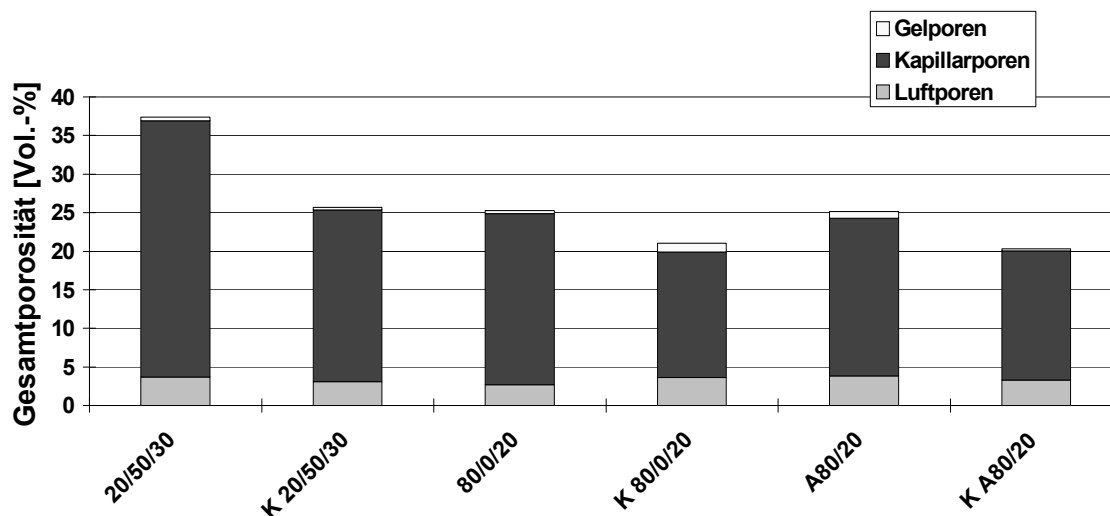


Bild 51: Gesamtporosität ausgewählter Mischungen vor und nach der Optimierung der Sieblinie

Die Gesamtporosität der Mischungen war ebenfalls kleiner. Bild 50 zeigt die Gesamtporosität vor und nach der Optimierung der Sieblinie. Die Gesamtporosität wies nun Werte von 24 bis 17 Vol.-% auf. Bei Betrachtung der Gesamtporosität der Mischungen (Bild 51) fällt auf, dass der Gelporenanteil und der Luftporenanteil nahezu gleich bleiben, sich aber die Kapillarporen verringern.

An Probemauerungen im Labor zeigte sich, dass gerade bei stark saugenden Steinen (z. B. Ziegel) das Wasserrückhaltevermögen (WRV) nicht ausreichend hoch war. Den Frischmörteln wurde das zum Abbinden benötigte Wasser entzogen und zwischen Mörtel und Stein zeigten sich Risse. Aus diesem Grund wurden die Mischungen (Tabelle 7) bezüglich ihres Wasserrückhaltevermögens weiter optimiert.

5.4 Optimierung des Wasserrückhaltevermögens

5.4.1 Mörtelmischungen

Den Mischungen wurde 0,75 M.-% Methylcellulose (MC) bezogen auf den Bindemittelanteil zugesetzt, die das benötigte Wasser in den Mörteln zurückhält. Die Probenbezeichnungen der Mischungen wurden mit dem Zusatz MC versehen. Die Mischungen blieben ansonsten wie in Tabelle 8 angegeben.

Tabelle 8: Mischungen nach Optimierungen des Wasserrückhaltevermögens

	Probebezeichnung	K 20/50/30	K 40/30/30	K 60/10/30	K 80/0/20	K A80/20
	MC	MC	MC	MC	MC	MC
	Bindemittel : Zuschlag	1:4	1:4	1:4	1:3,5	1:2
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	20	40	60	80	
	β -Halbhydrat [M.-%]	50	30	10		
	Anhydrit [M.-%]					80
	Kalkhydrat	30	30	30	20	20
Gesteinsk. (100%)	KSM [M.-%]	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
	QS 0,6 [M.-%]	15,75	15,75	15,75	15,75	15,75
	KBS 1 [M.-%]	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
	KBS 2 [M.-%]	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50
	QS 4 [M.-%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Additiv	Weinsäure* ¹	X	X	X	X	
	Kaliumsulfat * ²					X
	Wasser/Bindemittel-Verhältnis	0,93	0,83	0,78	0,63	0,52

*¹ 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

5.4.2 Ergebnisse:

Für ein ausreichendes Wasserrückhaltevermögen wurde in den Anforderungen nach Abschnitt 3 ein Wert von $> 80\%$ gefordert. Das Wasserrückhaltevermögen aller bis dahin entwickelten Mörtel lag weit über diesem Wert (siehe Tabelle 9) und dennoch war dies nicht ausreichend genug. Bei Probemauerungen im Labor hatten diese Mörtel keinen Verbund zum Stein (siehe hierzu Bild 58).

Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen ergaben, dass sich durch die Zugabe von Methylcellulose der Luftporengehalt (Bestimmung nach Kapitel 4 im Luftporentopf) der Frischmörtel erhöhte und das Wasserrückhaltevermögen verbesserte. Aus der Praxis ist bekannt, dass sich ein Luftporengehalt von ca. 10-20 % positiv auf die Verarbeitungseigenschaften des Frischmörtels auswirkt. Diese Verbesserung stellte sich auch hier ein, nachdem sich der Luftporengehalt durch die Zugabe der Methylcellulose von 2,7 bis 4,8 % auf 14,3 bis 20,0 % erhöhte. In Tabelle 9 sind der Luftporengehalt und das Wasserrückhaltevermögen mit und ohne Methylcellulose angegeben.

Tabelle 9: Luftporengehalt und Wasserrückhaltevermögen der Frischmörtel

Probe	Luftporengehalt [%]	Wasserrückhaltevermögen [%]
K (20/50/30)	2,7	91,9
K (40/30/30)	2,8	94,6
K (60/10/30)	2,9	91,2
K (80/0/20)	4,8	93,1
K A(80/20)	3,3	95,6
K (20/50/30) MC	20,0	98,1
K (40/30/30) MC	18,0	98,7
K (60/10/30) MC	15,5	98,9
K (80/0/20) MC	14,3	99,1
K A(80/20) MC	5,6	99,1

In wie weit sich der Zusatz der Methylcellulose auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Mörtel auswirkte, wird durch Bild 52 verdeutlicht. Die Methylcellulose erhöhte nicht nur den Luftporengehalt im Frischmörtel sondern auch den des erhärteten Mörtels (Bild 53), und bewirkte dadurch eine weitere leichte

Abnahme der Festigkeiten der Mischungen mit Halbhydrat. Auch bei der Mischung mit Anhydrit war eine leichte Abnahme der Druckfestigkeit zu verzeichnen (von ca. 18 auf 15 [N/mm²], siehe Tabelle A 5.3 im Anhang).

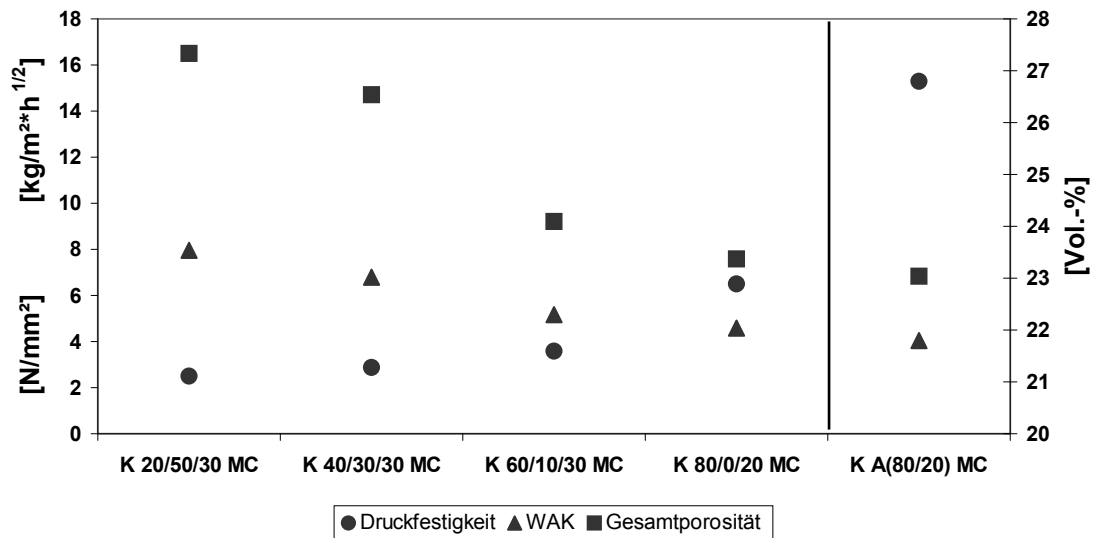


Bild 52: Korrelation der 28 Tage Druckfestigkeit mit der Gesamtporosität und dem kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten

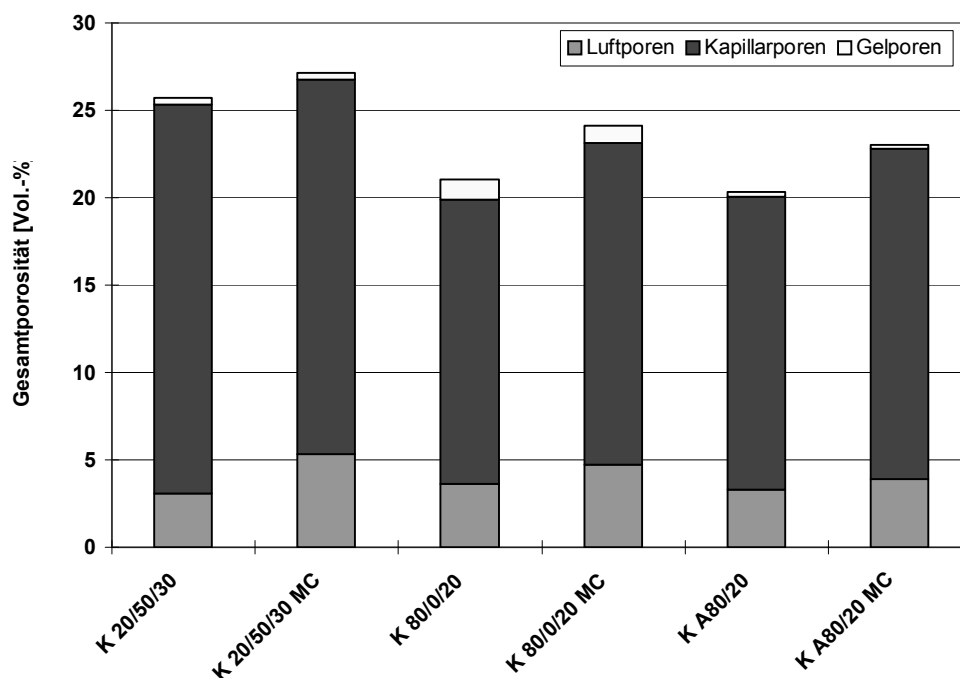


Bild 53: Anteil unterschiedlicher Poren in den Mörtelproben mit und ohne Methylcellulose

Der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient wurde ebenfalls kleiner und lag für die Proben zwischen 8 und 4 $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}]$ statt zwischen 17 und 10 $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}]$. Im Gegensatz dazu erhöhte sich die Gesamtporosität der Proben. Bild 53 stellt die Luft-, Kapillar- und Gelporenverteilung der Mörtelproben mit und ohne Methylcellulose gegenüber. Während die Luftporen zunahmen, blieb der Gehalt an Kapillar- und Gelporen nahezu gleich.

Betrachtete man die Gefügestruktur der Proben unter dem Rasterelektronenmikroskop, so konnte man auch dort den Unterschied im Luftporenbereich beobachten. Im Vergleich zur Probe (20/50/30) (Bild 54 ohne Methylcellulose) ist der deutliche Anstieg der Luftporen durch Zugabe von Methylcellulose bei gleicher Vergrößerung (Bild 55) erkennbar. Bei weiterer Vergrößerung und Betrachtung der Gefügestruktur der Gipskristalle ist dagegen kein Unterschied mehr zu bemerken (Bilder 56 und 57).

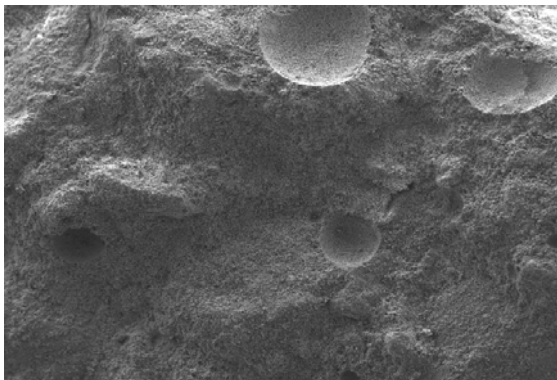


Bild 54: REM Aufnahme der Probe K (20/50/30), Bildbreite 4,8 mm

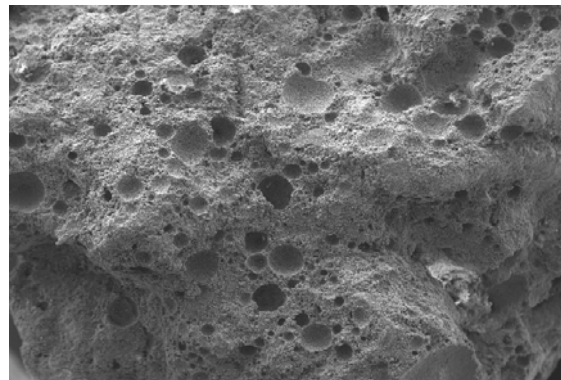


Bild 55: REM Aufnahme der Probe K(20/50/30)MC, Bildbreite 4,8 mm

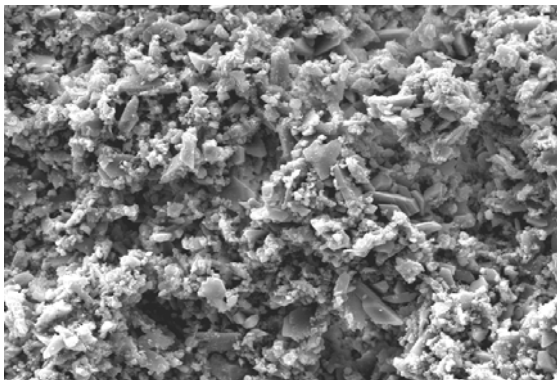


Bild 56: REM Aufnahme der Probe K (20/50/30), Bildbreite 144 μm

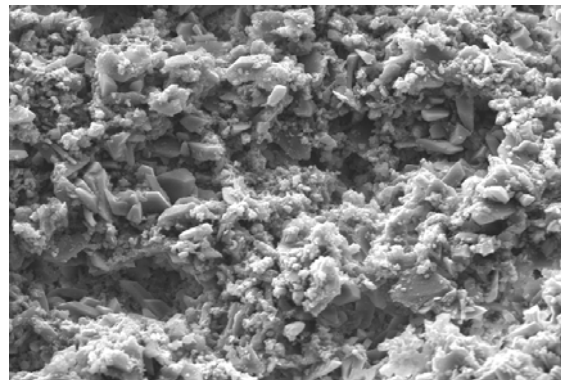


Bild 57: REM Aufnahme der Probe K (20/50/30), Bildbreite 144 μm

Betrachtet man sich die Bilder 58 und 59, so ist der Einfluss der Methylcellulose visuell erkennbar. Wurde mit einem Mörtel (K (20/50/30)) ohne Methylcellulose vermauert, so ließ sich der Stein ohne sichtlichen Haftverbund zwischen Mörtel und Stein abheben. Dagegen trat der Bruch beim Mörtel mit Methylcellulose innerhalb des Mörtels auf und nicht zwischen Stein und Mörtel.



Bild 58: schlechte Flankenhaftung ohne Methylcellulose;
Probe K (20/50/30)



Bild 59: gute Flankenhaftung mit Methylcellulose;
Probe K (20/50/30) MC

An allen Mischungen wurde das Ausblühverhalten nach Kapitel 4 untersucht. Keiner der hier untersuchten Mörtel zeigte Ausblühungen. Dies ist positiv und lässt weder optische noch technologische Einschränkungen für den Einsatz an historischen Gebäuden erwarten.

Ebenfalls wurde an allen Mischungen der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel nach Kapitel 4 untersucht. Alle untersuchten Mörtel zeigten nach 50 Frost-Tau-Wechseln keine Schädigung. Im Anhang A 7.2 sind verschiedene Mörtelproben nach der Untersuchung des Frost-Tau-Widerstandes wiedergegeben.

5.5 Untersuchung unterschiedlich feuchtebeanspruchter Gips-Kalk Mörtel

Die Transportmechanismen der Feuchtigkeit in Abhängigkeit von der Porosität der entwickelten Mörtel zu erfassen, wurden im folgenden unterschiedlich feuchtebeanspruchte Gips-Kalk-Mörtel untersucht.

5.5.1 Untersuchte Proben

An ausgewählten Mischungen wurden das Verhalten und ihre Eignung für den Außenbereich untersucht. Dazu wurden Testmauern aus Ziegeln gemäß der Beschreibung in Kapitel 4 errichtet, die bis zum Abschluss dieser Arbeit für 2,5 Jahre im Außenbereich der Universität Kassel der natürlichen Atmosphäre ausgesetzt wurden. Dem Entwicklungsstand entsprechend wurden die Mauern mit den Mörtelmischungen K (20/50/30) MC, K (80/0/20) MC und K A(80/20) MC (Mischungen siehe Tabelle 8) gemauert und nach 12, 24 und nach 29 Monaten beprobt und untersucht. Wie in Bild 60 dargestellt, wurden an allen drei Mauern zu jedem Beprobungszeitpunkt 2 Bohrkerne mit einem Durchmesser von 5 cm trocken über die gesamte Mauertiefe entnommen. So wurden die Mörtel in den beiden Außenbereichen (Nord- und Südseite) und aus der Mauermitte untersucht. Die Proben, die aus dem Außenbereichen der Bohrkerne entnommen wurden, waren maximal 1 cm tief. Im Folgenden werden die Proben mit 253, 802 und A82 abgekürzt; die Indizes n,i und s stehen für Nord, Innen und Süd.

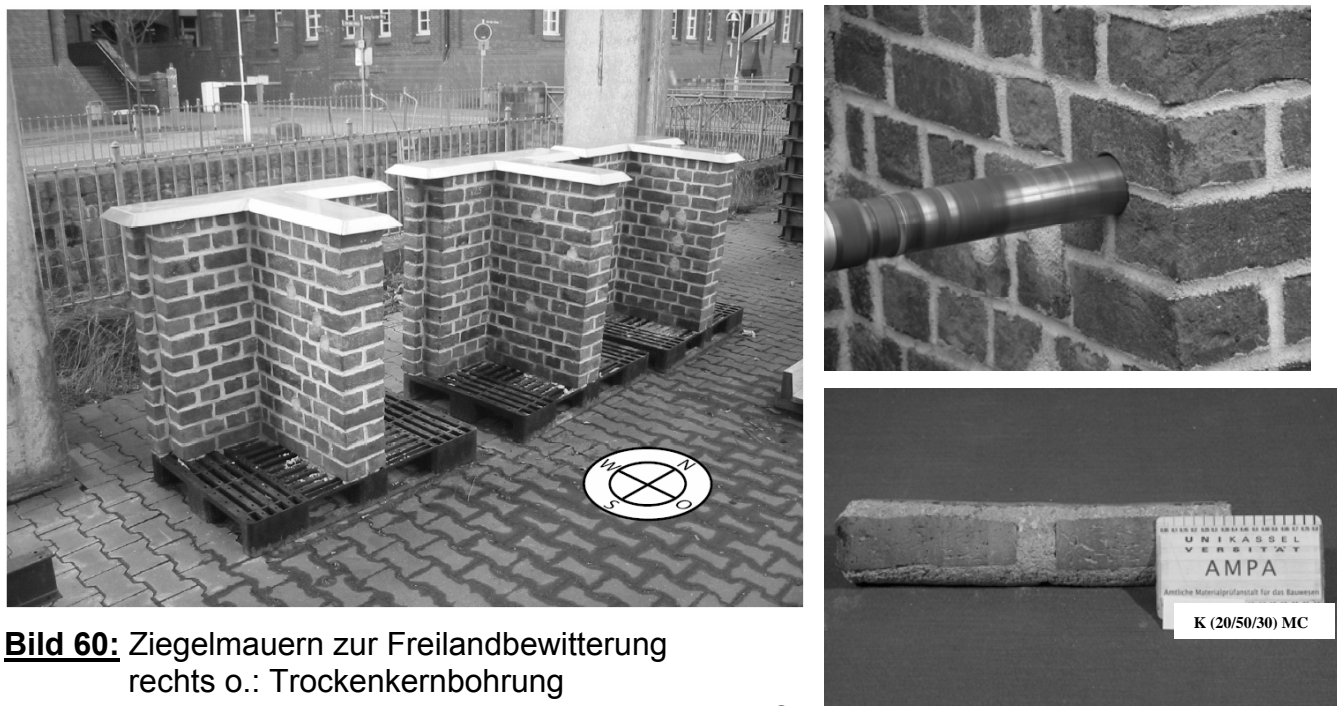


Bild 60: Ziegelmauern zur Freilandbewitterung
rechts o.: Trockenkernbohrung
rechts u.: Bohrkern der Probe K (20/50/30) MC

Des Weiteren standen jeweils neun Mörtelprismen der drei Mischungen zur Verfügung, die zuvor jeweils unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt waren. Die Proben mit der Bezeichnung B wurden der im Kapitel 4 beschriebenen

Beregnung im Klimaschrank über 90 Tage ausgesetzt. Die mit dem Buchstaben F bezeichneten Proben wurde bei 5°C 90 Tage dauerhaft feucht gelagert (Klima 5/95). Weitere mit K bezeichnete Proben wurde 90 Tage im Normklima 20/65.

Der Porenraum der Proben wurde sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt. Die Basis beider Untersuchungen bildete dabei die Quecksilberdruckporosimetrie. Darauf aufbauend wurden mit der Berechnungssoftware, „Pore-Cor“ der Firma Micromeritics, rechnerische Analysen durchgeführt.

5.5.2 Ergebnisse

An den Proben sollte untersucht werden, inwieweit eine Gefügeveränderung über die Zeit stattfand. Bild 61 zeigt die Mittelwerte der Porenradienverteilung der Bohrkernproben aus den drei Messungen, die zu den Beprobungszeitpunkten durchgeführt wurden. Die Proben aus der Südseite der Mauern zeigten bei allen drei Mischungen eine geringere Porosität als die aus der Mitte und aus der Nordseite. Der Witterungseinfluss auf die Fugenmörtel war somit vom Süden her durch eine höhere Sonneneinstrahlung und einer dadurch bedingten höheren Abtrocknungsrate größer als auf der Nordseite. Dass sich auch auf der Nordseite der Mauern der Mörtel verdichtet hatten, ist nur anhand der Probe K A(80/20) MC zu erkennen.

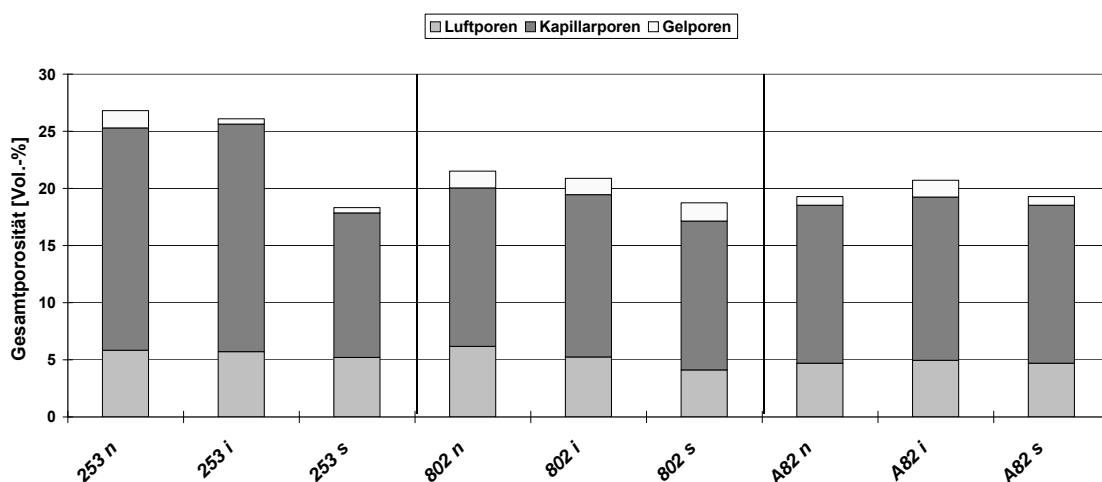


Bild 61: Porenklassifizierung der Bohrkernproben; Mittelwerte aus drei Messungen

Um detailliertere Aussagen treffen zu können, inwieweit sich das Gefüge über die Zeit verändert hatte, gab der Mittelwert keine Auskunft. In den Bildern 62 und 63 sind die Porenradienverteilungen der Bohrkernproben von der Nordseite und von der Südseite dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Porosität über die Zeit hinabnahm. Die Ergebnisse der Bewitterung im Klimaschrank (siehe Bild 35) ließen sich mit den Bildern 62 und 63 korrelieren. Durch den Einfluss von nass-trocken Zyklen findet eine An- und Umkristallisation im Gefüge statt. Durch die definierten Zeiten ist dieser Einfluss im Labor ausgeprägter. Die Proben aus der Bewitterung im Labormaßstab (Bild 36) zeigten eine deutliche Zunahme der Gelporen bei gleichzeitiger Verringerung der Kapillarporen. In wie weit dieser Effekt auch an den Bohrkernproben der Mauern nachweisbar ist, lässt sich anhand des direkten Vergleiches der Kapillarporen erläutern (Bild 64).

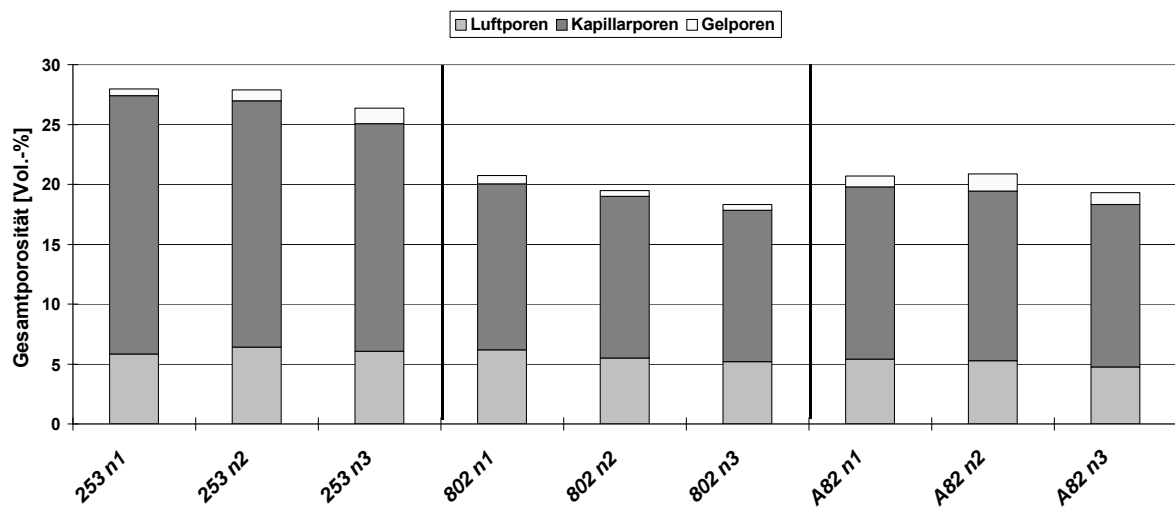


Bild 62: Porenklassifizierung der Bohrkernproben, Nordseite

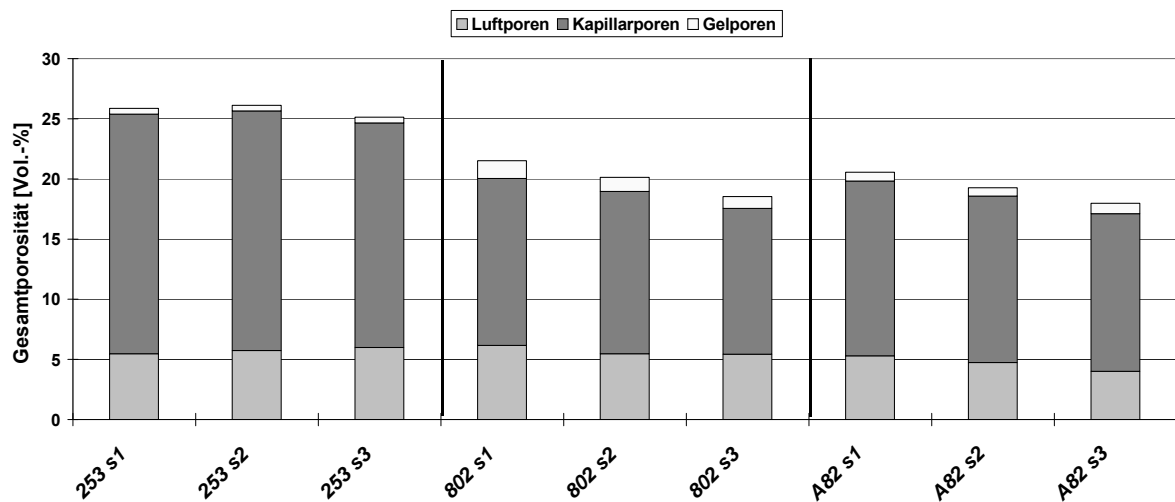


Bild 63: Porenklassifizierung der Bohrkernproben, Südseite

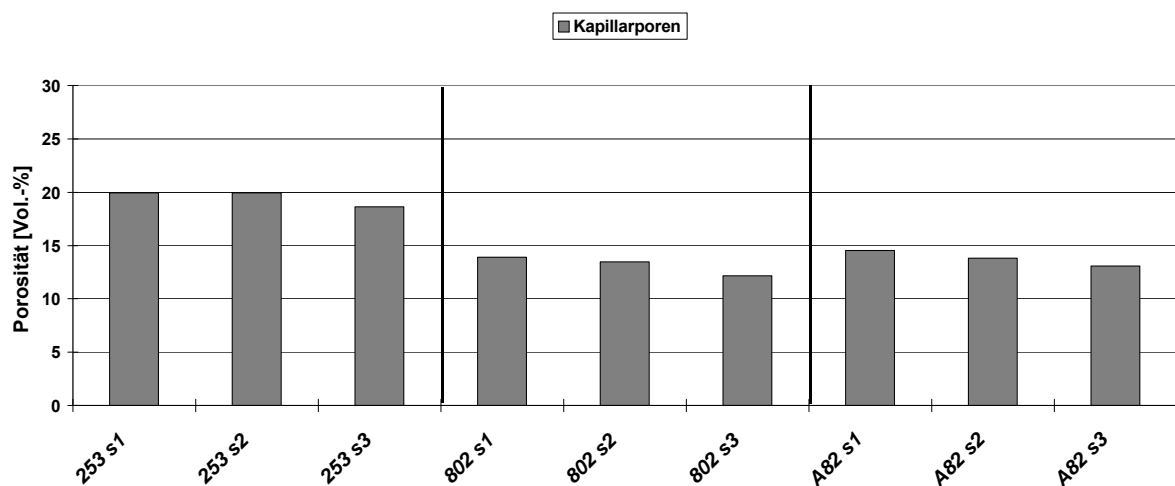


Bild 64: Kapillarporenanteil der Bohrkernprobe; Südseite

Anhand des Bildes 64 ist eine kontinuierliche Abnahme der Kapillarporen zu verzeichnen. Dies war bei allen drei Mischungen zu beobachten. Im Anhang A 8 (Bild A 8.2) ist der Anteil an Gelporen wiedergegeben. Die Gelporen hingegen nahmen nur bei der Mischung 802 ab. Im Gegensatz dazu blieb der Gelporengehalt der beiden anderen Mischungen nahezu gleich. Daran ist erkennbar, dass sich bei den Proben in der Außenwitterung die Verringerung der Kapillarporen nicht über eine gleichzeitige Zunahme der Gelporen erläutern lässt, wie dies bei den Proben in der

Bewitterung im Klimaschrank der Fall war. Hier verringerte sich die Gesamtporosität nur durch eine Abnahme der Kapillarporen.

Während die Proben aus der Bewitterung im Klimaschrank nach einer Zeit von 90 Tagen untersucht wurden, erfolgte die Untersuchungen der Bohrkernproben erst nach 12, 24 und 29 Monaten. Die Umkristallisation in den Bohrkernproben muss offenbar dann so weit fortgeschritten sein, dass sich gebildete Gelporen schon wieder verschlossen haben.

Betrachtet man nun die Rohdichte der Bohrkernproben (Bild 65), so bestätigte sich, dass diese bei allen Testmauern außen geringfügig höher lagen als innen. Es zeigte sich auch, dass die Dichtezunahme von innen nach außen bei den Proben aus den Testmauern mit den Mörteln K (20/50/30) MC und K A(80/20) MC deutlicher war als beim Mörtel K (80/0/20) MC.

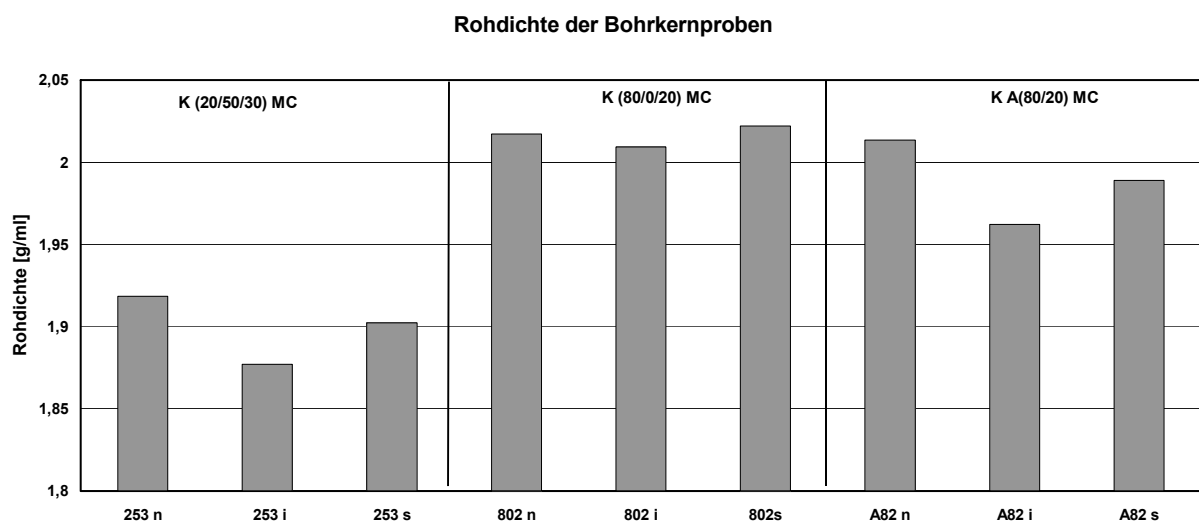


Bild 65: Rohdichte der Bohrkernproben der Testmauern

Bei der Auswertung der Gesamtporosität der Prismenproben (Bild 65) ließt sich ebenfalls feststellen, dass die Porosität der bewitterten Proben fast durchweg geringer war als die der bei Normklima gelagerten Vergleichsproben. Innerhalb einer Mischungsreihe zeigten die künstlich berechneten Proben jeweils den höchsten prozentualen Anteil an Gelporen bei gleichzeitiger Verringerung des Kapillarporenanteils.

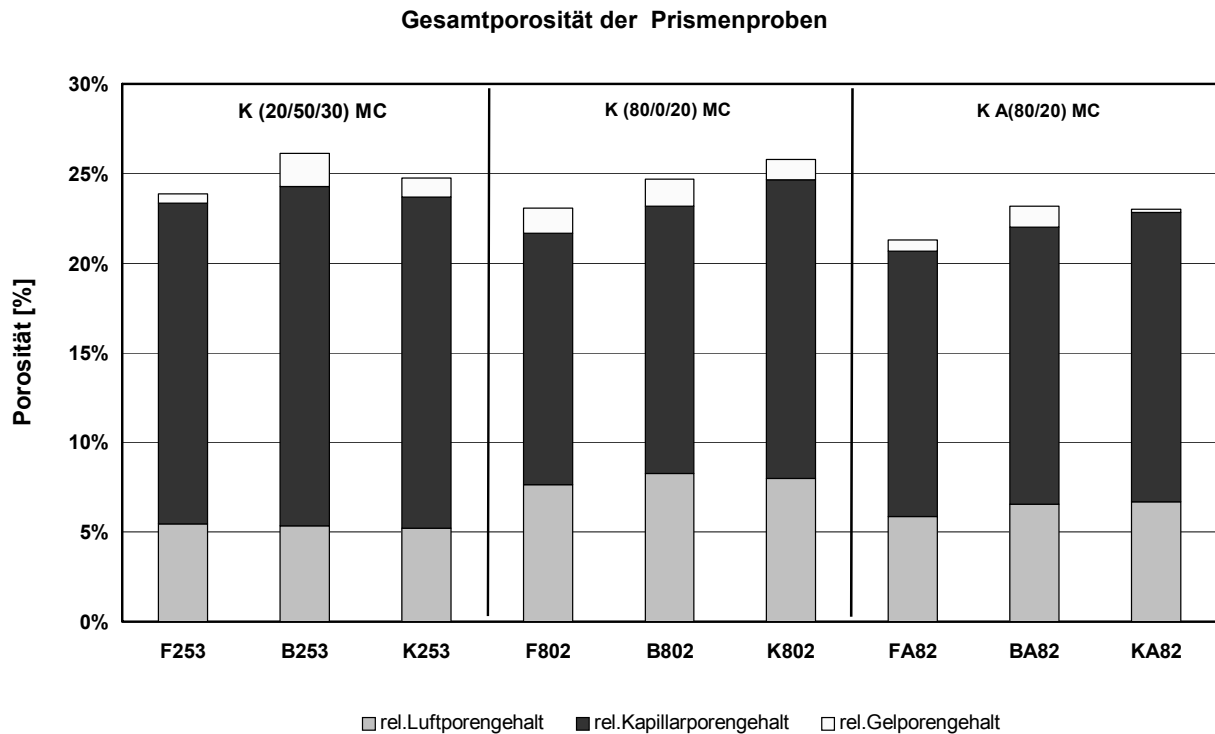


Bild 66: Gesamtporosität und Porenklassifizierung der Prismenproben

Bei Betrachtung der Porenradienverteilung zeigte sich bei den bewitterten Proben eine Verschiebung hin zu kleineren Werten, wie in Bild 67 für verschiedene Lagerungsarten der Prismen der Mischung K A(80/20) MC beispielhaft dargestellt wird. Die Porenradienverteilung der Probe B A82 wies im Maximalbereich der Porenradien um ca. 2 μm einen geringeren Anteil auf, dafür enthielt sie einen größeren Anteil Mikroporen im Bereich von 0,01 bis ca. 0,3 μm . Die unbewitterte Probe K wies dagegen im kapillaren Bereich von 1 bis 10 μm die höchsten Anteile auf. Auch beim Vergleich der anderen Mischungen war ein derartiger Unterschied zwischen bewitterten und unbewitterten Proben zu erkennen. Diese Verschiebung hin zu kleineren Porenradien war ebenfalls kennzeichnend für ein sich verdichtendes Gefüge durch Einfluss von nass-trocken Zyklen.

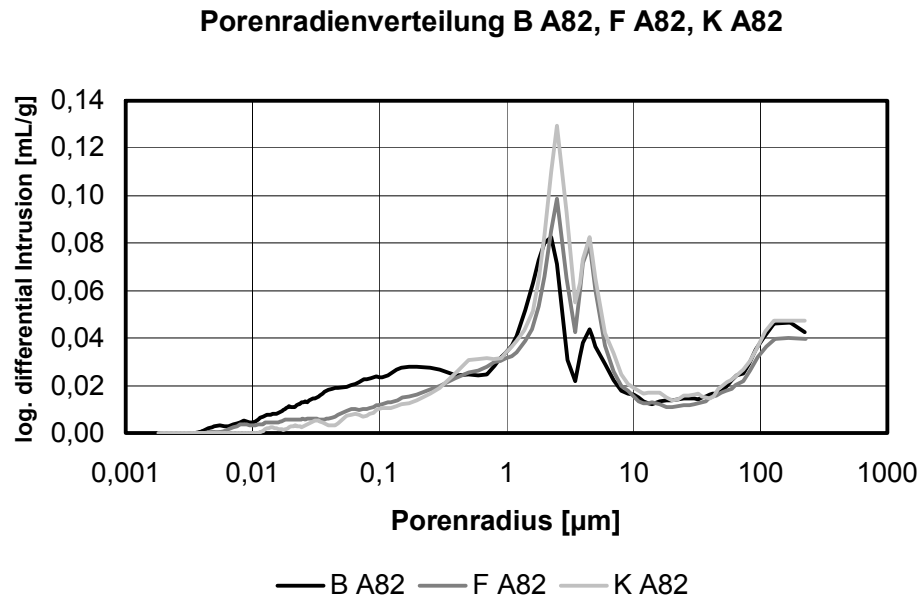


Bild 67: Porenradienverteilung der Prismenproben K A(80/20) MC

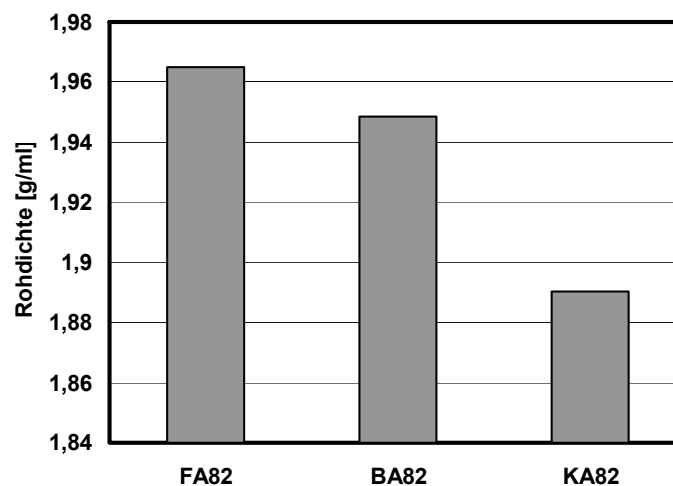


Bild 68: Rohdichten der Prismen der Mischungszusammensetzung K A(80/20) MC

Verdeutlicht wurde dies durch den Vergleich der Rohdichten der Prismenproben K A(80/20) MC. Bild 68 zeigt, dass die feuchtgelagerte Probe F A82 mit 1,96 g/ml die höchste Rohdichte aufwies, Probe B A82 lag mit 1,94 g/ml etwas darunter. Einen im Vergleich dazu deutlich kleineren Wert verzeichnete die Probe K A82 mit nur 1,89 g/ml. Dieser Wert konnte als Ausgangswert angesehen werden, da sich aufgrund der Lagerung im Normklima die Dichte der Probe seit der Herstellung kaum geändert

haben kann. Im Vergleich dazu hatte sich bei den beiden anderen Proben eine Verdichtung von rund 3% eingestellt.

Ebenso wie die Porosität gibt auch die Feststoffverteilung Aufschluss über die Gefügestruktur. Die dargestellten Histogramme stellen die mit Pore-Cor ermittelte relative Häufigkeit einzelner Partikel innerhalb der modellierten Struktur dar. Einem Balken ist dabei jeweils die Häufigkeit einer Porengrößenklasse zugeordnet, so dass sich diskrete Werte ergeben. Dabei wurden die Partikel, ähnlich wie die Porenradienverteilung, nach Größenradien in μm sortiert.

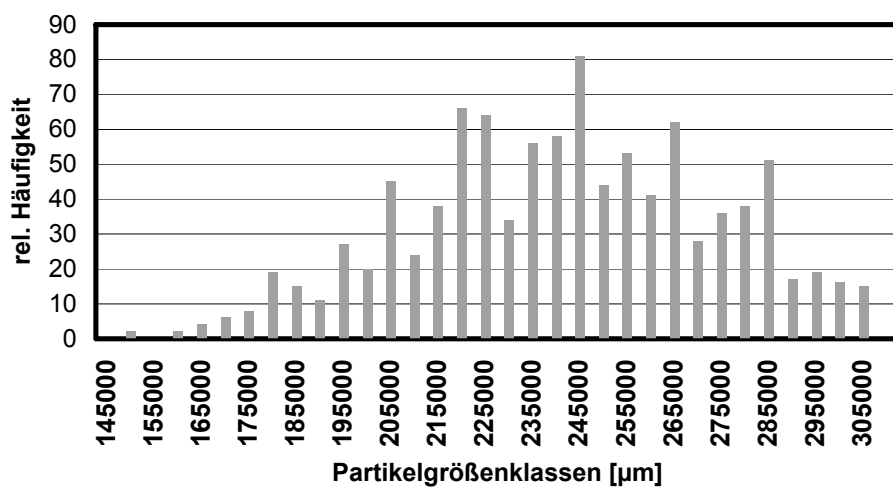


Bild 69: Feststoffverteilung der Bohrkernprobe 253 innen

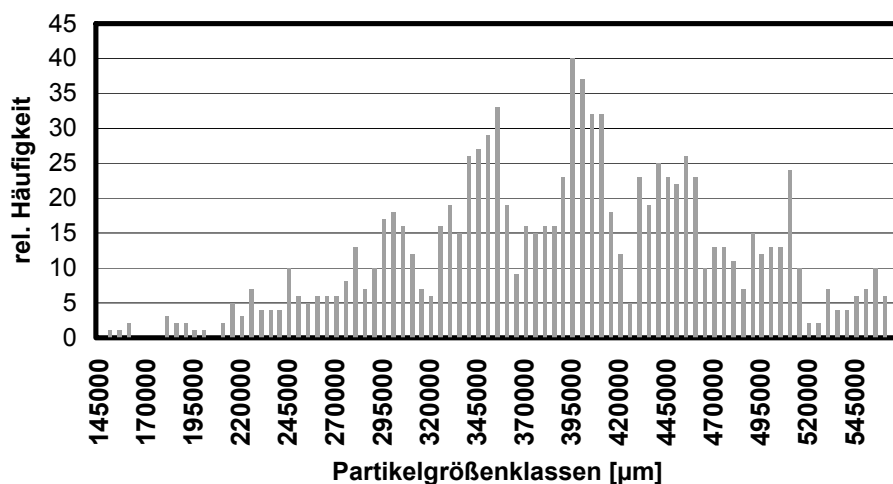


Bild 70: Feststoffverteilung der Bohrkernprobe 253 süd

Die Bilder 69 und 70 zeigen deutlich den Unterschied in der Feststoffverteilung einer grob- und einer feinstrukturierten Probe. Die Verteilung der stärker der Witterung ausgesetzten Probe 253 süd ist deutlich weiter gespreizt als bei der innen liegenden Probe.

Ergeben sich bei der Feststoffverteilung einer Probe hohe Häufigkeitswerte in einem eng gestuften Größenbereich, so deutete das darauf hin, dass die Materialstruktur von wenigen größeren Feststoffkörpern geprägt wird. Es ist dann mit einer niederen Dichte zu rechnen. Ein hoher Maximalwert des Histogrammes lässt daher unabhängig vom zugehörigen Feststoffradienbereich auf eine eher grobkörnige Struktur schließen. Bei einer weitgestuften Häufigkeitsverteilung können sich jeweils kleinere Partikel in den Zwickelhohlräumen größerer Feststoffe anlagern.

In Bild 71 ist zu sehen, dass bei den Proben aus dem Inneren der Mauern, in denen der Mörtel noch nahezu die Ausgangsporosität besaß, die höchsten Maximalwerte und damit eine eher grobe Feststoffverteilung vorhanden war, während in den Außenbereichen mit dichteren Mörteln eher feiner waren. Zusätzlich ist eine Abstufung zwischen der Nord- und der Südseite zu erkennen. Die bestätigt wiederum, dass der Einfluss der Bewitterung auf der Südseite stärker ist als auf der Nordseite.

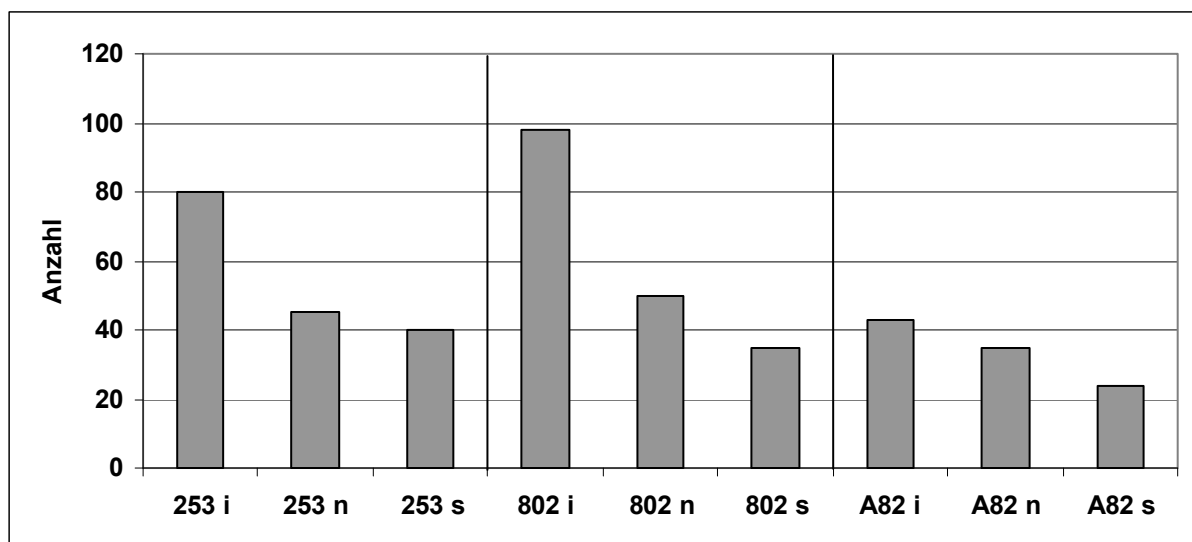


Bild 71: Maximalwert der Partikelhäufigkeit der Bohrkernproben

Vergleicht man die Ergebnisse der Maximalwerte der Feststoffverteilung der Bohrkernproben mit denen der Prismen (vergl. Bild A 7.17), so zeigten sich bei den Prismenproben der Reihe B stärkere Veränderungen gegenüber den Nullproben, als bei den Proben der Testreihe F. Dies bestärkt erneut die Vermutung, dass wechselnde hygrothermische Einflüsse die gefügeverändernden Prozesse beschleunigen.

Auch die optische Gefügeanalyse unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigte ebenfalls deutliche Hinweise auf eine Verdichtung des bewitterten Gefüges.

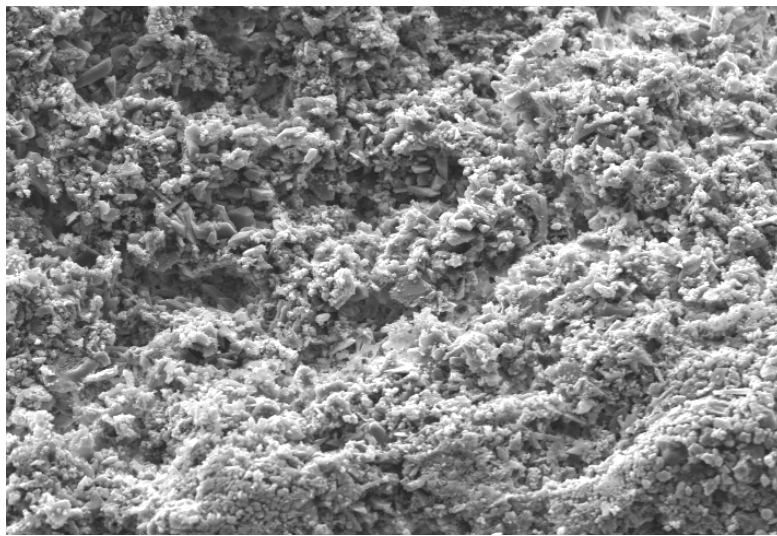


Bild 72: REM Aufnahme der Probe K (20/50/30) MC vor der Bewitterung im Klimaschrank; Bildbreite 290 µm

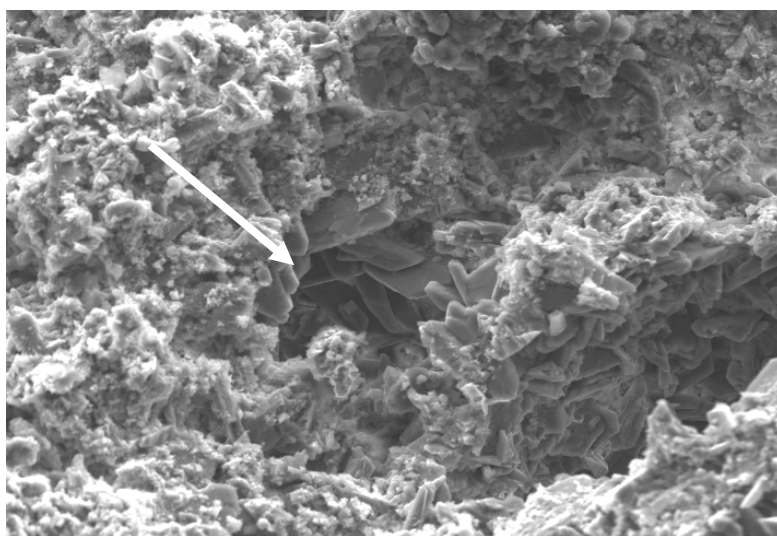


Bild 73: REM Aufnahme der Probe K (20/50/30) MC nach der Bewitterung; Bildbreite 290 µm

In Bild 72 ist eine unbewitterte Probe der Mischung K (20/50/30) MC dargestellt. Bild 73 gibt dazu im Vergleich dieselbe Mischung nach der Bewitterung wieder. Deutlich zu erkennen ist eine beginnende Auskristallisation in einer Pore (siehe Pfeil). Auch in Bild 74 ist die beginnende Auskristallisation in einer Pore erkennbar. Dieses Auskristallisieren größerer Porenbereiche erfolgt mit neugebildeten vergleichsweise großen Gipskristallen. Derartige Füllungsprozesse reduzieren die Gesamtporosität und erhöhen gleichzeitig die mittlere Partikelgröße. In Bild 75 sind dagegen Anlösungen an Gipskristallen zu erkennen.

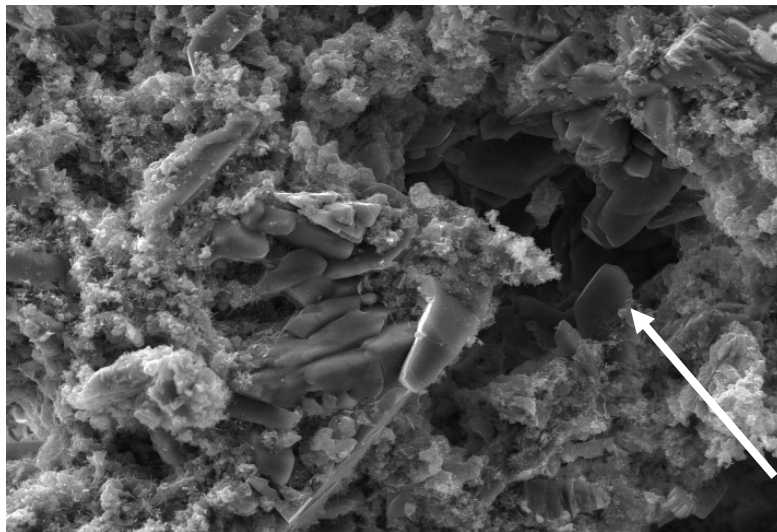


Bild 74: REM Aufnahme der Probe K (20/50/30) MC nach der Bewitterung;
Bildbreite 145 µm

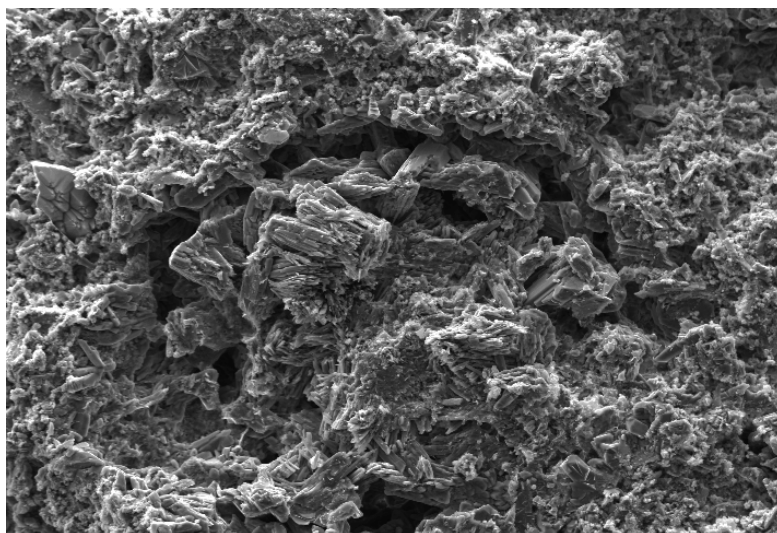


Bild 75: REM Aufnahme der Probe K (20/50/30) MC nach der Bewitterung;
Bildbreite 570 µm

Die Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie ließen sich mit dem Programm Pore-Cor dreidimensional darstellen. Die folgenden Bilder geben eine Auswahl an simuliertem Porenraum wieder. Der gefüllte Porenraum wurden vereinfachend kubisch dargestellt; die Verbindungsröhren geben die kapillaren Verbindungen zwischen den Poren wieder. Anhand der Bilder 76 und 77 wird somit der geringere Gesamtporengehalt der Bohrkernprobe 253s (Bild 77), siehe oben rechts, gegenüber der Bohrkernprobe 253i (Bild 76) visualisiert.

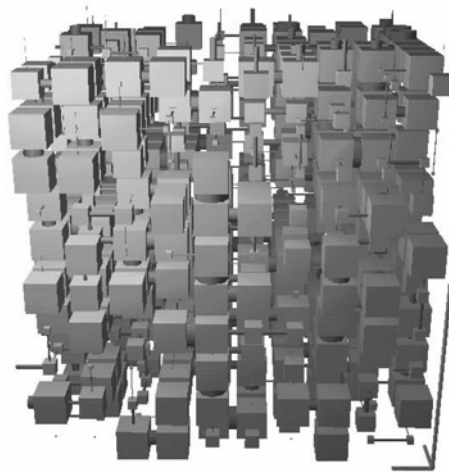


Bild 76: Dreidimensionale Simulation der Bohrkernprobe 253 i

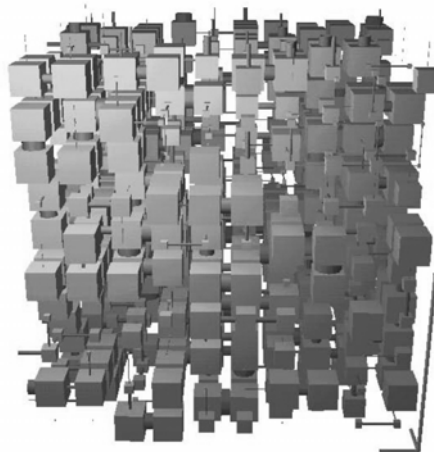


Bild 77: Dreidimensionale Simulation der Bohrkernprobe 253 s

5.6 Thaumasitbildung in Gips-Kalk Mörteln

Durch den Anteil an hydraulischen Komponenten in den eingesetzten Kalkhydraten bestand für die entwickelten Instandsetzungsmörtel ein Potential für eine Ettringit- und/oder Thaumasitbildung. Wie hoch dieses Potential war, sollte in den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen geklärt werden.

5.6.1 Mörtelmischungen und Untersuchungsmethoden

In folgender Tabelle 10 sind die Mischungszusammensetzungen angegeben, die in diesem Abschnitt untersucht wurden.

Tabelle 10: Zusammensetzung der auf Thaumasit hin untersuchten Mörtel

	Probebezeichnung	253	135	135K	802	505	505K	A82	A55	A55K	C253	C135K
	Bindemittel : Zuschlag	1:4	1:4	1:4	1:3,5	1:3,5	1:3,5	1:2	1:2	1:2	1:4	1:4
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	20,00	14,30	14,30	80,00	50,00	50,00				20,00	14,30
	β -Halbhydrat [M.-%]	50,00	35,70	35,70							50,00	35,70
	Anhydrit [M.-%]							80,00	50,00	50,00		
	CL-80 [M.-%]	30,00	50,00	50,00	20,00	50,00	50,00	20,00	50,00	50,00		
	CEM I 52,5R [M.-%]										30,00	50,00
Gesteinsk. (100%)	KSM [M.-%]	3,75	3,75	15,00	3,75	3,75	15,00	3,75	3,75	15,00	3,75	15,00
	QS 0,6 [M.-%]	15,75	15,75	13,91	15,75	15,75	13,91	15,75	15,75	13,91	15,75	13,91
	KBS 1 [M.-%]	60,00	60,00	52,99	60,00	60,00	52,99	60,00	60,00	52,99	60,00	52,99
	KBS 2 [M.-%]	15,50	15,50	13,69	15,50	15,50	13,69	15,50	15,50	13,69	15,50	13,69
	QS 4 [M.-%]	5,00	5,00	4,42	5,00	5,00	4,42	5,00	5,00	4,42	5,00	4,42
Additiv	Weinsäure* ¹	X	X	X	X	X	X				X	X
	Kaliumsulfat * ²							X	X	X		
	w/b-Wert	0,93	1,00	1,05	0,63	0,81	0,90	0,51	0,66	0,70	0,88	0,93

*¹ 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

Zum Vergleich wurden auch Gips-Kalk-Mörtel untersucht, die nach 13 Jahren Freilandbewitterung aus einer Testfläche¹² der St. Wilhadi Kirche in Stade im Sommer 2004 entnommen wurden. Die Zusammensetzung dieser Mörtel ist in Tabelle 11 wiedergegeben.

¹² Die Testfläche wurde von [3] angelegt. Die detaillierte Mörtelzusammensetzungen und die verwendeten Ausgangsstoffe sind in [3] angegeben.

Tabelle 11: Mörtelzusammensetzung der Gips-Kalk Mörtel aus Stade

	Probe	S20	S24	S32
Bindemittel	α -Halbhydrat [M.-%]	20	20	20
	β -Halbhydrat [M.-%]	50	50	50
	CL- 70 [M.-%]	30	30	30
Zuschlag	Kalksteinmehl [M.-%]	20	0	25
	Quarzsand [M.-%]	0	20	25

Um das Thaumasitbildungspotential der entwickelten Instandsetzungsmörtel abschätzen und vergleichen zu können, wurden bei den Vergleichsmischungen bewusst der Anteil an Kalkhydrat im Bindemittel erhöht (von 30 M.-% auf 50 M.-% des Bindemittels). Weiterhin wurde das Kalksteinmehl von 3,75 M.-% auf 15 M.-% erhöht (Probenbezeichnung K). Außerdem wurde kommerzieller Portlandzement (CEM I 52,5 R (Kapitel 5.1)) zugegeben (Probenbezeichnung C). Als Zuschlag wurde Kalksteinbrechsand und Quarzsand sowie ein Kalksteinmehl nach Kapitel 5.1 eingesetzt. Das Halbhydrat wurde mit Weinsäure verzögert, der Anhydrit mit Kaliumsulfat (K_2SO_4) angeregt. Die Mischungen sind in Tabelle 10 wiedergegeben. Dort sind auch das Bindemittel/Zuschlag- Verhältnis, der Wasser/Bindemittel- Wert, die eingesetzten Bindemittel und die verwendeten Additive angegeben.

Als Probekörper wurden im Labor Prismen der Abmessungen 160 mm * 40 mm * 40 mm in Anlehnung an DIN 1164-7 hergestellt (siehe Kapitel 4). Eine Serie (3 Prismen) wurde in einem Klimaraum bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit (20/65) gelagert, ein weitere Serie im Klimaschrank bei 5°C und 95 % relativer Feuchtigkeit (5/95).

Während der gesamten Lagerungszeit wurde -wie in Kapitel 4 beschrieben- Quellen und Schwinden nach DIN 52450 gemessen. Des weiteren wurden der dynamische E-Modul sowie die Biegezug- und Druckfestigkeit nach 7, 28 und 90 Tagen erfasst. Um die Mikrostruktur zu charakterisieren und um eventuelle Reaktionsprodukte zu ermitteln, wurden Proben im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht, die Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) bestimmt und der Phasengehalt mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) erfasst.

5.6.2 Ergebnisse

Gemäß Gleichung 1, Kapitel 2.4, wurde der „Cementation Index“ (CI) der verwendeten Kalke berechnet, um die hydraulischen Komponenten zu klassifizieren. Für den bisher eingesetzten Kalk CL80 (DIN EN 459) errechnete sich der CI basierend auf der chemischen Analyse zu 0,68. Zum Vergleich wurde der CI für weitere handelsübliche Kalke (siehe Kapitel 5.1) berechnet (Tabelle 12).

Tabelle 12: CI der untersuchten Kalkhydrate

	CL 80	CL 80 S	CL90 S	PC 54	PC 50
CI	0,68	0,44	0,04	0,012	0,008

Aus diesem Vergleich wurde deutlich, dass der verwendete CL80 einen höheren CI hatte als die anderen, d. h. der Anteil an hydraulischen Komponenten war höher. Es ließ sich somit schon an dieser Stelle vermuten, dass auch das Ettringit- bzw. Thaumasitbildungspotential dieses Kalkes größer war.

In Bild 78 ist zu erkennen, dass die Proben, die im Klima 20/65 gelagert wurden, kein Quellen zeigten, sondern unterschiedlich stark schwanden. Das größte Schwinden zeigte die Probe mit Zement (C253). Die Proben, die mit Halbhydrat hergestellt wurden, zeigten das geringste Schwinden. Dieses Ergebnis war zu erwarten. Bild 79 zeigt das Quellen der Proben, die im Klima 5/95 gelagert wurden. Die Proben mit einem hohen Anteil an hydraulischen Komponenten (hydraulischer Kalk, Zement) zeigten auch ein starkes Quellen. Die Proben mit einem geringen Anteil an hydraulischen Komponenten (253, A82 und 802) wiesen ein leichtes Quellen auf. Diese Ergebnisse zeigten, dass der Anteil an hydraulischen Komponenten im Mörtel tendenziell mit dem Schwinden korreliert.

In Bild 80 sind die Druckfestigkeiten der Mörteln nach 90 Tagen wiedergegeben, die unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen gelagert wurden. Die Proben, die im Klima 20/65 gelagert wurden, wiesen eine höhere Festigkeit auf, als solche, die im Klima 5/95 gelagert wurden. Aber dieses Ergebnis gab zunächst noch keinen eindeutigen Aufschluss darüber, dass sich in den Proben Thaumasit gebildet haben könnte. Bekannt ist, dass die Festigkeit von Mörteln mit Gipsbindemitteln mit zunehmender Feuchtigkeit abnimmt (siehe auch [45, 46, 47]).

Bild 81 zeigt die Ergebnisse der quecksilberdruckporosimetrischen Untersuchungen. Die Porosität der Proben, die im Klima 5/95 gelagert wurden, war im Vergleich zu den im Klima 20/65 gelagerten größer. Dies könnte auf eine Thaumasit- oder Ettringitbildung in den Proben hinweisen. Sieht man sich die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie in Bild 82 an, so wird deutlich, dass die Proben nach Lagerung 20/65 keine Thaumasit- oder Ettringit Peaks aufwiesen. Im Gegensatz dazu konnten in den Proben nach Lagerung 5/95 Phasen an Ettringit und/oder Thaumasit nachgewiesen werden (Bild 82).

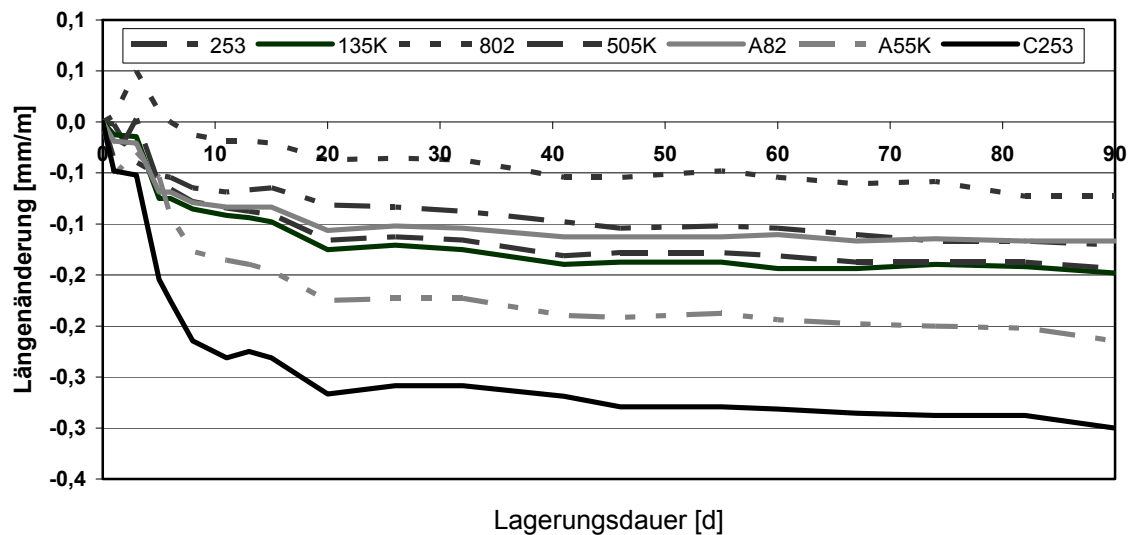


Bild 78: Quellen und Schwinden der im Labor hergestellten Mörtelproben, Lagerung 20/65

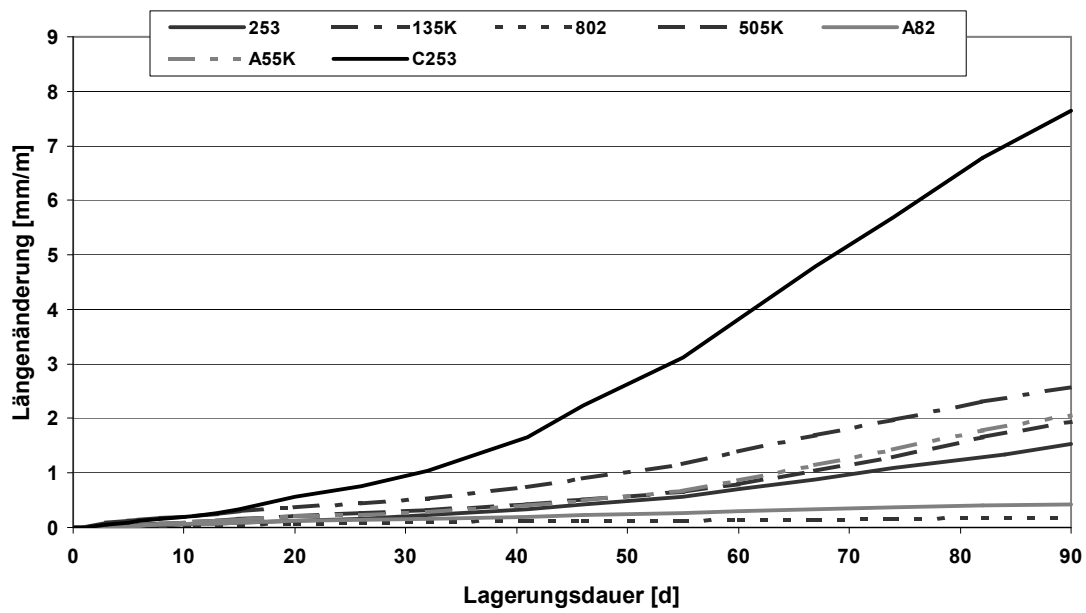


Bild 79: Quellkurve der im Labor hergestellten Proben, Lagerung 5/95

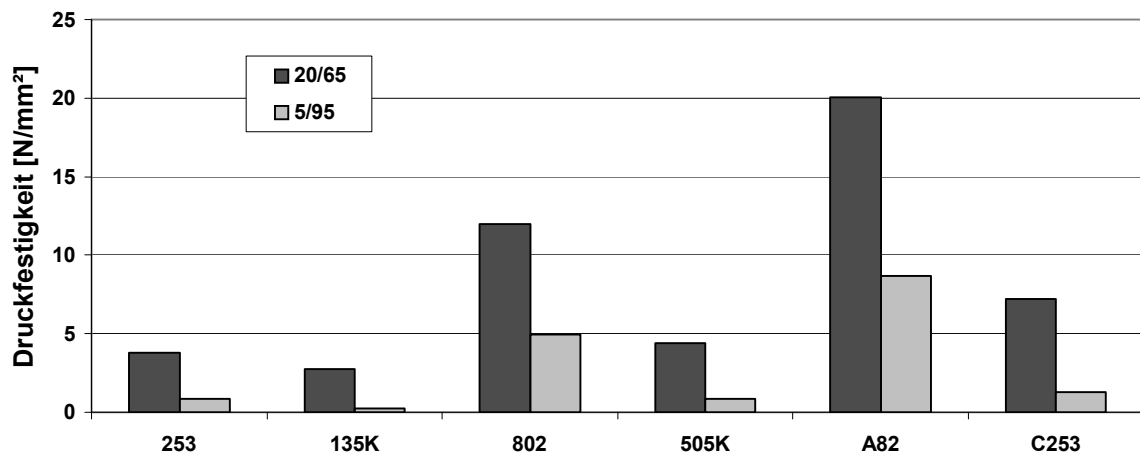


Bild 80: Druckfestigkeit der im Labor unter unterschiedlichen Bedingungen gelagerten Proben

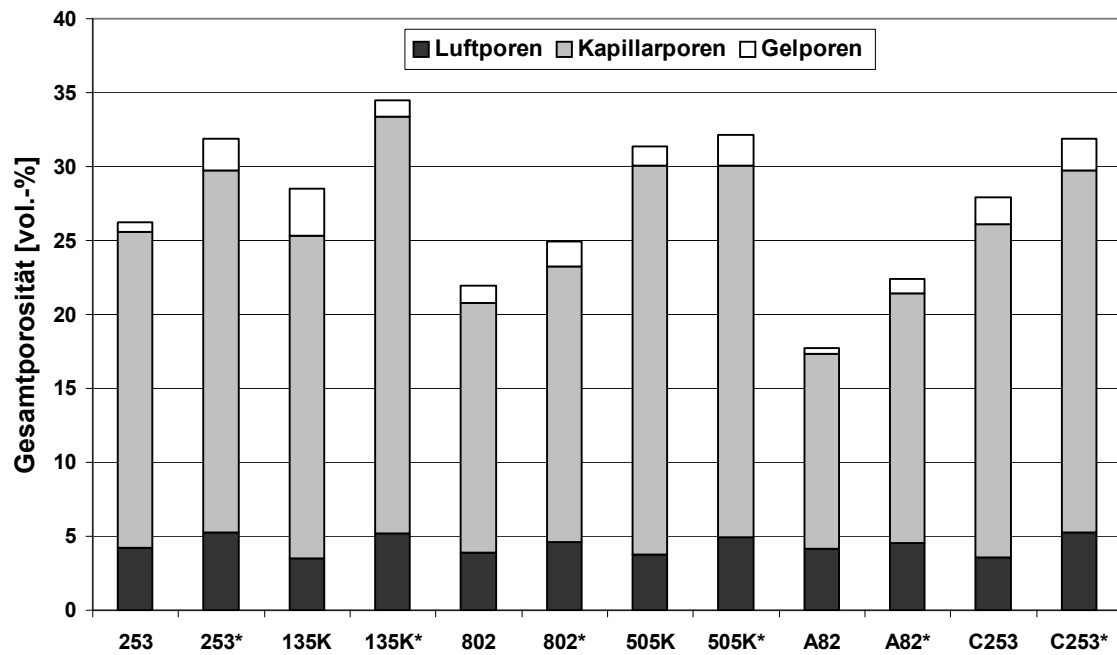


Bild 81: Porosität der im Labor unter unterschiedlichen Bedingungen gelagerten Proben, (* 5/95)

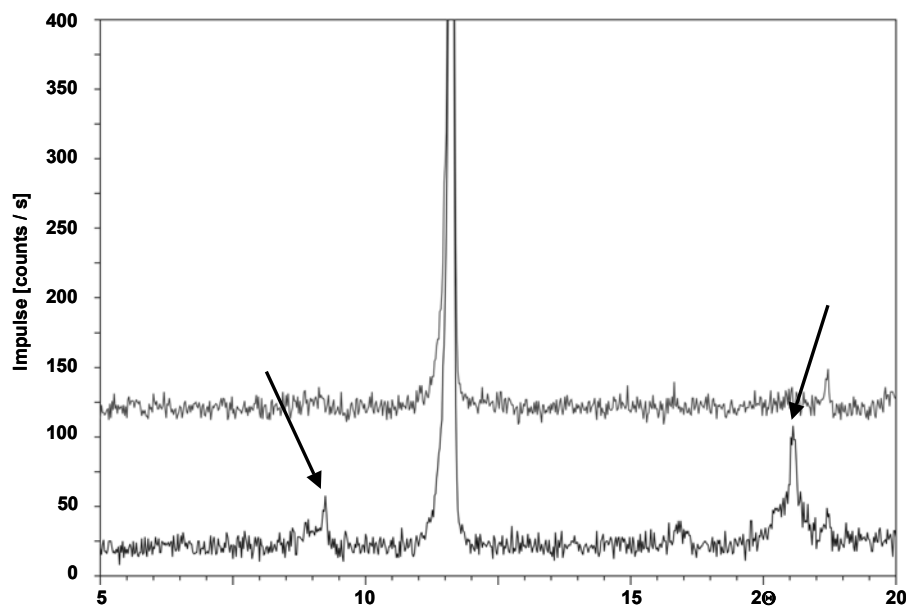


Bild 82: XRD Diagramm der Probe 253 gelagert unter 20/65 (oben) und 5/95 (unten), Pfeile markieren Thaumasyt und/oder Ettringit Peaks

Die XRD-Ergebnisse und auch die festgestellte Porosität zeigten, dass ein Ettringit- oder Thaumasytbildungspotential in Gips-Kalk Mörteln (hier Proben 253, 802 und A82) bei geringer Temperatur und unter Einwirkung von Feuchtigkeit vorhanden war.

Basierend auf den Ergebnissen des Quellens und Schwindens (Bild 78) sowie auf Ergebnissen von lichtmikroskopischen Untersuchungen (Bild 88 und 89) kann allerdings gesagt werden, dass dieses geringe Vorkommen von Ettringit/Thaumasit keine Störungen des Mikrogefüges hervorgerufen hatten. Die Ergebnisse der Proben mit einem höheren Gehalt an hydraulischen Komponenten zeigten aber (siehe Anhang A 6), dass sich dort deutlich mehr Ettringit/Thaumasit gebildet hat. Gerade die Proben C253 und die Probe 135K mit höherem Gehalt an CL 80 zeigten ein deutlich höheres Quellen und einen Abfall der Druckfestigkeit, was auf die Bildung von Thaumasit hinweist. Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop bestätigten, dass in Proben mit geringem hydraulischen Anteil kein Thaumasit nachgewiesen werden konnten. Dies war aber in den Proben mit einem erhöhten Anteil an hydraulischen Komponenten der Fall (Bild 83). Erkennbar ist dies auch am Diagramm der XRD Untersuchungen (Bild 84). Aus diesen Ergebnissen kann man ableiten, dass geringe Anteile an hydraulischen Komponenten in Gips-Kalk Mörteln nicht schädlich sind. Übersteigt der Anteil ein kritisches Limit, so fielen die physikalisch-mechanischen Eigenschaften aufgrund der Bildung von Ettringit und Thaumasit dagegen ab. Dann kann auch eine Dauerhaftigkeit nicht mehr garantiert werden. Eine weitere Auswahl an Bildern zur Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop der übrigen Proben befinden sich im Anhang A 6.

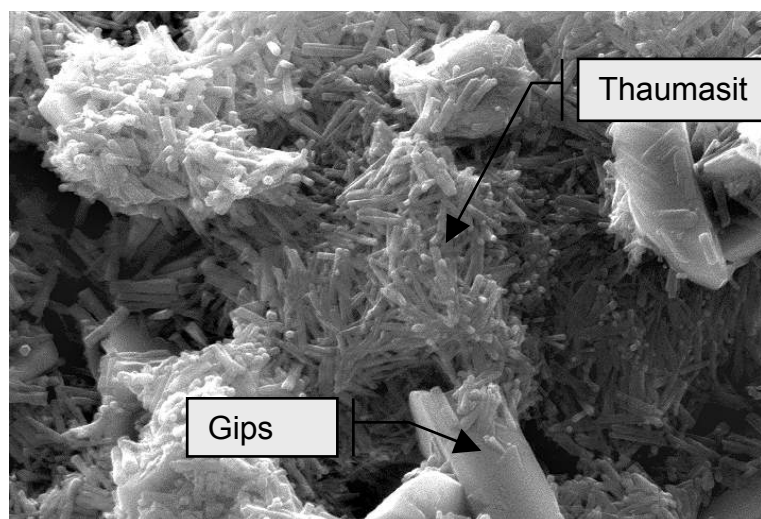


Bild 83: REM Bild der Probe C253 gelagert unter 5/95
Bildbreite 23 µm

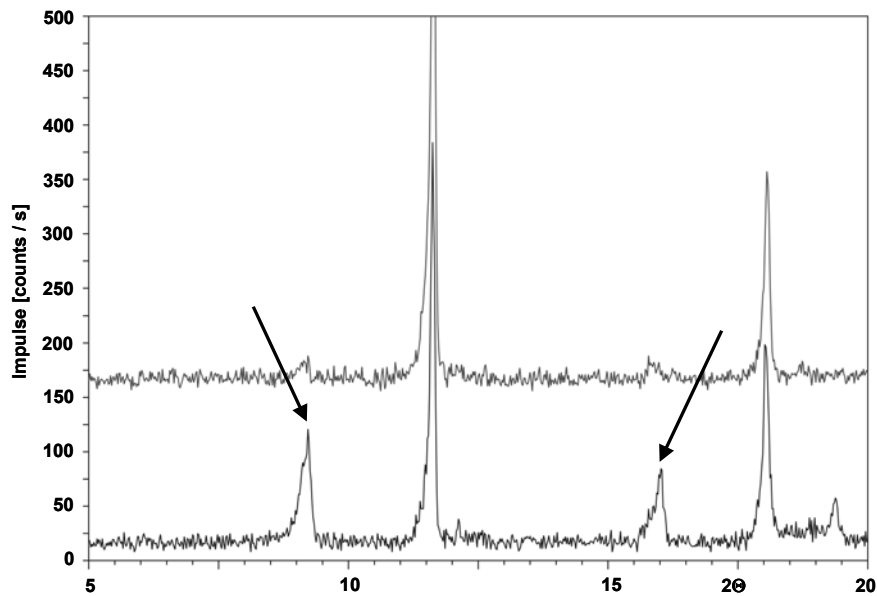


Bild 84: XRD Diagramm der Probe C253 gelagert unter 20/65 (oben) und 5/95 (unten), Pfeile markieren Thaumasyt und/oder Ettringite Peaks

1992 wurden an der St. Wilhadi Kirche in Stade Testflächen mit Gips-Kalk Mörteln angelegt (Mischungen siehe Tabelle 11), die mehr oder weniger identisch sind mit der Laborprobe 253. Nach 13 Jahren Außenbewitterung waren augenscheinlich keine Schäden am Gebäude erkennbar (Bild 84). Im Röntgendiffraktometer konnten Spuren von Thaumasyt und Ettringite nachgewiesen werden (Bild 85). Des weiteren konnten mit dem Rasterelektronenmikroskop einige Thaumasytkristalle lokalisiert werden. Dennoch war keine mikrostrukturelle Schädigungen aufgetreten, wie in den Bildern 87, 88 und 89 ersichtlich ist. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Spuren von Thaumasyt und Ettringite in den Proben nachweisbar waren, diese aber keine Verschlechterung der Dauerhaftigkeit hervorgerufen hatten.



Bild 85: St. Wilhadi Kirche in Stade (links), Testfläche (rechts)

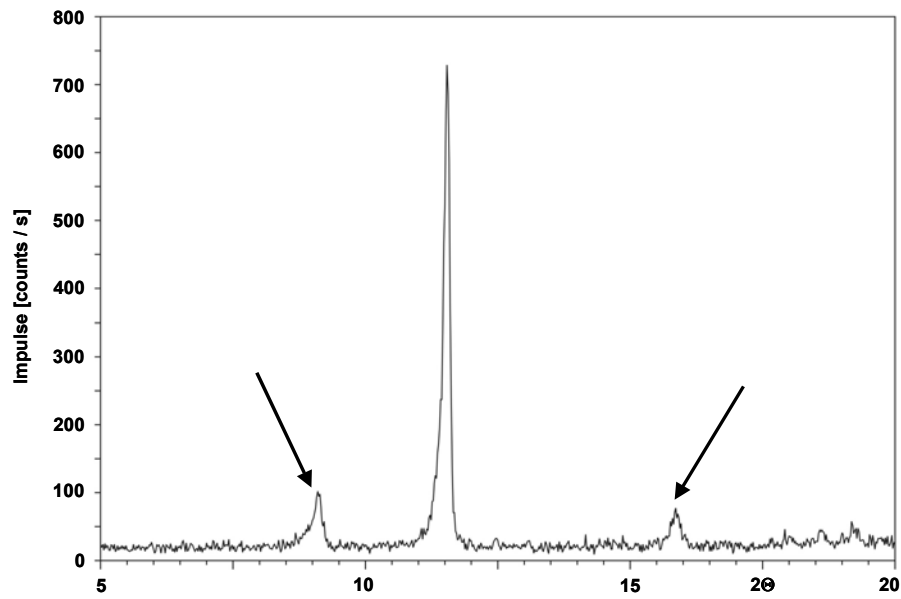


Bild 86: XRD Diagramm der Mörtelprobe S24, Pfeile markieren die Thaumasil und/oder Ettringit Peaks

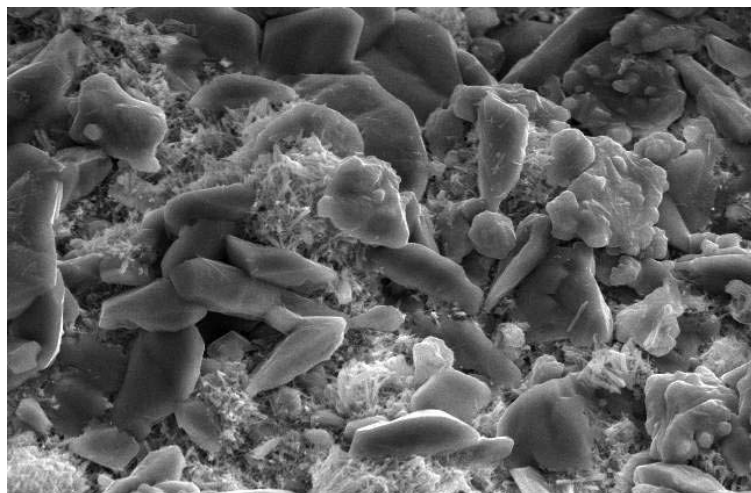


Bild 87: REM Aufnahme der Mörtelprobe S24, Bildbreite : 70µm

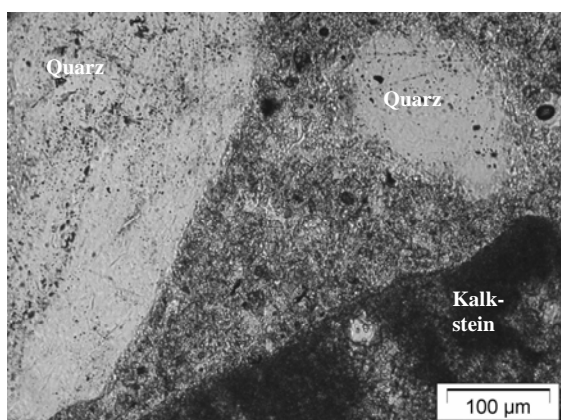


Bild 88: Dichtes Gefüge der Mörtelprobe, S24;

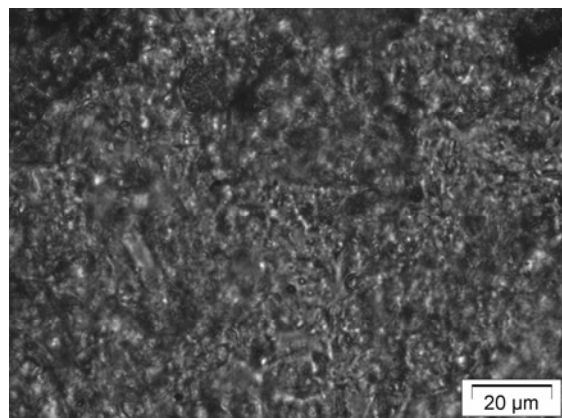


Bild 89: Detailansicht der Mörtelprobe S24

Aus diesen Ergebnissen ergab sich für die auf Basis all dieser Untersuchungen entwickelten Instandsetzungsmörtel, dass das im Bindemittel enthaltene Kalkhydrat ausgetauscht wurde. Statt des CL80 wurde ein CL90 (Bezeichnung PC 54) eingesetzt, da dieser aufgrund seiner Zusammensetzung einen sehr niedrigen CI von nur 0,012 aufwies (siehe Tabelle 12) und ein Ettringit- bzw. Thaumasitbildungspotential damit sehr gering sein dürfte. Im Folgenden wird darauf eingegangen, in wie weit sich diese Veränderung auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Mörtel auswirkte. Die Mörtelzusammensetzungen entsprechen den Mischungen aus Tabelle 8. Die Probenbezeichnungen wurden mit dem Zusatz PC54 versehen.

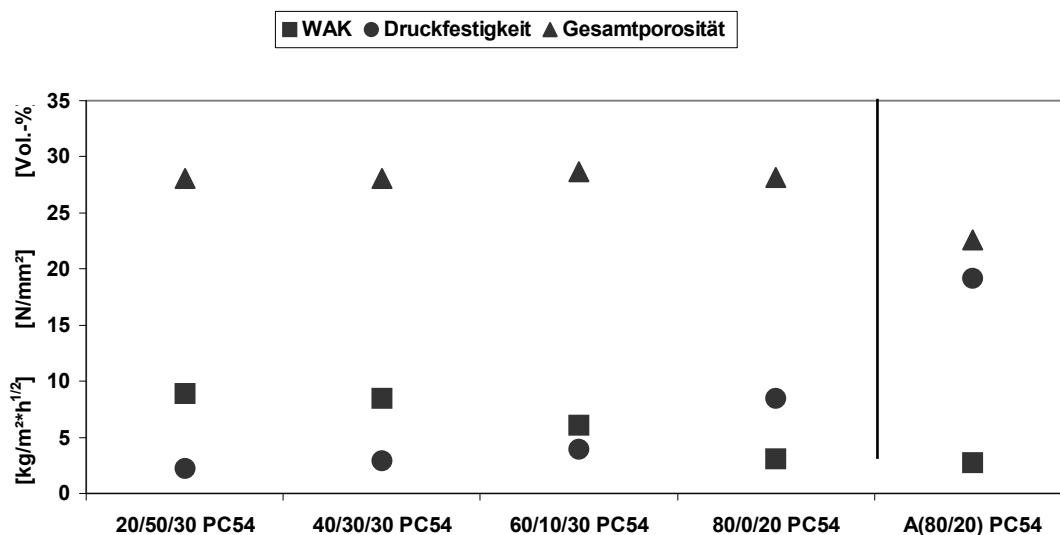


Bild 90: Porosität, 28 Tage Druckfestigkeit und kapillarer Wasseraufnahme der Mischungen mit CL90 (PC54)

Der Austausch des Kalkhydrates bewirkte eine Verringerung der 28 Tage Druckfestigkeit (siehe hierzu Bild 52). Mit 2,2 N/mm² war die Druckfestigkeit der Mischung (20/50/30) PC54 sehr niedrig. Die Mischung 80/0/20 PC54 wies eine deutlich höhere Druckfestigkeit von 8,4 N/mm² auf. Auch in diesem Fall war der Anstieg der Druckfestigkeit auf die Zunahme von α -HH im Bindemittel zurückzuführen. Die Druckfestigkeit der Mischung A(80/20) PC54 war mit 19,2 N/mm² am höchsten. Proportional zur fallenden Druckfestigkeit stiegen der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient und die Gesamtporosität im Vergleich zu den Mischungen mit CL80 (siehe Kapitel 5.4) an. Der Einfluss des Kalkhydrates wirkte sich auch auf die Rohdichte und den dynamischen E-Modul aus. Beide Werte verringerten sich im Vergleich zu den Mischungen mit dem zuvor verwendeten

Kalkhydrat CL80. Die Messwerte der Mischungen mit CL90 (PC54) können im Anhang A 6 eingesehen werden. Auch bei diesen Mischungen traten keine Schädigung durch Frost-Tau-Wechsel und keine Ausblühungen auf.

Am Beispiel der ausgewählten Mischung (20/50/30) sind die Änderung der 28 Tage Druckfestigkeit in Korrelation zur Wasseraufnahme und zur Gesamtporosität in Bild 91 wiedergegeben.

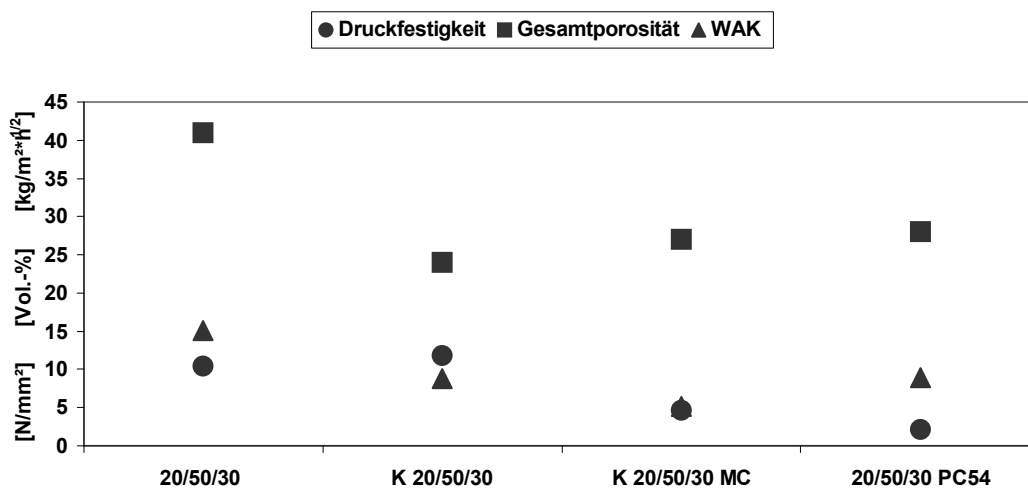


Bild 91: Vergleich der Porosität zur 28 Tage Druckfestigkeit und der kapillaren Wasseraufnahme

Die Mischung (20/50/30) ist in Tabelle 4 aufgeführt. Die Mischung K(20/30/50) kann Tabelle 7, K(20/50/30)MC Tabelle 8 entnommen werden. An der Mischung K(20/50/30) wurde die Sieblinie und das Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnis gemäß Abschnitt 5.3 geändert. Der Mischung K(20/50/30)MC wurde Methylcellulose zur Erhöhung des Wasserrückhaltevermögens (siehe Kapitel 5.3) hinzugefügt.

Betrachtet man die Gesamtporosität, so war eine deutliche Abnahme zwischen den Proben (20/50/30) und K (20/50/30) zu erkennen. Durch den Einfluss der Methylcellulose erhöhte sich die Gesamtporosität wieder und eine nochmalige geringe Steigung trat durch den Austausch des Kalkhydrates von CL80 durch CL90 ein.

5.7 Bauwerksapplikation

An den in Kapitel 3 und A 3 beschriebenen Objekten wurden Testflächen mit den Mörteln der verschiedenen Entwicklungsschritte angelegt, um diese direkt am Gebäude beurteilen zu können. Es sollten über den Verlauf der Jahre Erkenntnisse gewonnen werden, wie sich die Mörtel am Objekt und unter freier Bewitterung verhalten.

Erste Applikationen erfolgten an der St. Petri Kirche zu Bosau und der Katharinen Kirche in Hamburg. Appliziert wurden die Mischungen (20/50/30), (80/0/20) und A(80/20) gemäß Tabelle 4. Die Mischungen des nächsten Optimierungsschrittes mit der geänderten Sieblinie und dem veränderten Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnis (siehe Tabelle 7) wurden in der St. Petri Kirche Gülzow und der Johannis Kirche Katlenburg verwandt. Die Kirche in Katlenburg wurde mit einer zweiten Testfläche mit den Mörteln mit Methylcellulose (siehe Tabelle 8) versehen, die auch in ein Seitengebäude des Klosters Walkenried eingebracht wurden. Die letzte Testfläche wurde im Jahr 2005 am Dom in Ratzeburg angelegt. Sie besteht aus den optimierten Mischungen K (20/50/30) MC, K (80/0/20)MC und K A(80/20)MC gemäß Tabelle 8, bei denen das Kalkhydrat CL 90 eingesetzt wurde.

Die optische Begutachtung der Testflächen nach unterschiedlichen Zeitabständen bis zu 4 Jahren ergab, dass alle Mörtel eine ausreichende Verwitterungsresistenz aufwiesen. Einigen anfänglich auftretenden Flankenabrissen und Rissen durch die Fuge konnte durch die Veränderung der Sieblinie, des Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnisses und zuletzt noch durch die Verwendung der Methylcellulose entgegen gewirkt werden. Auftretende Ausblühungen hingen mit der früheren Belastung der historischen Gebäude zusammen.



Bild 92: Testfläche Johannis Kirche Katlenburg;

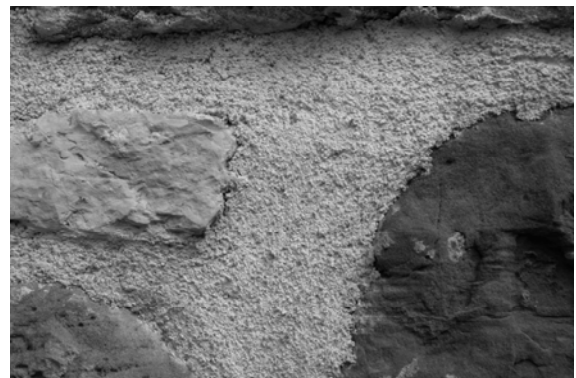


Bild 93: Detail des Mörtels K (20/50/30) nach 2 jähriger Bewitterung

Die Testfläche in Bild 92 wurde im Oktober 2003 mit den Mischungen K (20/50/30), K (80/0/20) und K A(80/20) hergestellt und nach 2 jähriger Bewitterung begutachtet. Es wurde kein Materialverlust festgestellt (vergl. Bild 93).

5.8 Diskussion der Ergebnisse

Alle Mörtel mit der in den Tabellen 3 bis 6 aufgeführten Zusammensetzung wurden im Klimaschrank hinsichtlich ihrer Verwitterungsresistenz untersucht. Weder die Änderung der Gesteinskörnung noch die Änderung des Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnisses oder auch die Zugabe von Methylcellulose hatten eine Auswirkung auf die Verwitterungsresistenz der Mörtel. Der Austausch des Kalkhydrates CL80 durch CL90 brachte ebenfalls keinen Unterschied. Wichtig war nur die Menge des Kalkhydrates im Bindemittel. Mit 20 und 30 M.-% Kalkhydrat im Bindemittel wurden keine Abwitterungen und kein Masseverlust mehr festgestellt. Die Entscheidung, ob ein CL80 oder ein CL90 verwendet wird, wird in erster Linie von den hydraulischen Komponenten bestimmt, die im Kalkhydrat vorhanden sind. Sie müssen klein sein, um das Entstehen von schädlichen Mengen an Ettringit- oder Thaumasit auszuschließen.

Bedingt durch die geringe Abbindezeit von Calciumsulfaten ist es unumgänglich, abbindeverzögernde Additive zur Herstellung calciumsulfatgebundener Mörtel einzusetzen. Diese beeinflussen die Kristallausbildung der Gipse dahingehend, dass sich Tracht und Habitus der Kristalle verändern. Durch den Einsatz der Weinsäure, die als Verzögerer für Halbhydrat eingesetzt wurde, bildeten sich eher große, gedrungene Kristalle. Damit kann der hohen Löslichkeit von Gips entgegen gewirkt werden.

Calciumcarbonat ist dagegen in Wasser nahezu unlöslich [48, 49, 50]. Deutlich wird dies, wenn man die Löslichkeit von Calciumcarbonat von 0,015 g/l bei 20°C der Löslichkeit von Gips gegenüber stellt. Damit sollte sich um die Calciumsulfatkristalle ein von Wasser nahezu unlösliches Gitter an Calciumcarbonat bilden. Des Weiteren wird das bei der Carbonatisierung entstehende Wasser die nahegelegenen Gipskristalle anlösen, die in Poren wieder auskristallisieren und somit einen guten Verbund herstellen.

Für die Verarbeitung von calciumsulfatgebundenen Mörteln ist eine wesentliche Stellgröße der Wasseranspruch des verwendeten Bindemittels, der den w/b-Wert beeinflusst. α -HH besitzt generell einen geringeren Wasseranspruch als β -HH. Je höher der Gehalt an α -HH im Bindemittel war, desto niedriger fiel der w/b-Wert aus. Aus diesem Grund unterschieden sich auch die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der beiden Calciumsulfate im erhärteten Zustand. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass sich mit steigendem w/b-Wert die Gesamtporosität erhöht und die Rohdichte in gleichem Maße verringert. Dies wurde gezielt genutzt, um die Eigenschaften der erhärteten Mörtel zu variieren. Über das Verhältnis von α -HH zu β -HH ließ sich die Festigkeiten der Mörtel bei gleichbleibenden chemisch-mineralogischen Eigenschaften gezielt einstellen. Mörtel nur mit Anhydrit ließ dies nicht zu.

Neben der guten Verwitterungsresistenz der Mörtel spielt auch eine praxisgerechte Verarbeitung eine entscheidende Rolle. Durch die Optimierung der Sieblinie und des Bindemittel-/Zuschlag-Verhältnisses konnte dies erreicht werden. Die Sieblinie und das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis beeinflussten aber nicht nur die Verarbeitbarkeit und die Flankenhaftung zwischen Mörtelfuge und Stein, sondern erhöhten auch die Verwitterungsresistenz, weil sich der Anteil an löslichen Komponenten im Mörtel verringerte. Je weniger lösliches Bindemittel vorhanden ist, desto weniger Angriffsmöglichkeiten für An- und Ablösungen durch Witterungsangriffe bestehen.

Durch den Einsatz von Methylcellulose wurde nicht nur das Wasserrückhaltevermögen verbessert, sondern gleichzeitig wurde durch die Erhöhung des Luftporengehaltes des Frischmörtels die Verarbeitbarkeit nochmals verbessert. Dabei wurde festgestellt, dass das allgemein geforderte Wasserrückhaltevermögen von gipsgebundenen Mörteln von > 80 % nicht ausreichend war. Durch die Zugabe von Methylcellulose wurde das Wasserrückhaltevermögen auf über > 98 % verbessert, was dann für eine ausreichende Haftung zwischen Mörtel und Stein ausreichend war.

Die Untersuchung unterschiedlich feuchtebeanspruchter Mörtelproben bestätigte, dass sich das Gefüge bei abwechselnden nass-trocken Zyklen durch An- und Umkristallisationen gipshaltiger Mörtel verdichtet. Dadurch werden vorhandene Poren insbesondere im oberflächennahen Bereich mit der Zeit verschlossen. Deutlich wurde dies nicht nur optisch durch die Betrachtung des Gefüges unter dem

Rasterelektronenmikroskop, sondern auch durch den Vergleich der Porosität. Es konnte eine Abnahme der Kapillarporen bei gleichzeitiger Zunahme an Gelporen beobachtet werden. Je geringer die Gesamtporosität der Mörtel war, desto kleiner war auch der Wasseraufnahmekoeffizient und entsprechend langsamer trocknen die Proben auch aus. Dadurch ist die Zeitspanne für die Verdunstung der gipsgesättigten Lösung ausreichend groß, um relativ große Gipskristalle bilden zu können, die die Kapillarporen in der oberflächennahen Zone verschließen.

Die chemisch-mineralogischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich in Gips-Kalk Mörteln bei niedrigen Temperaturen Thaumasit und/oder Ettringit bilden können, wenn im Kalk hydraulische Komponenten und im Mörtel carbonatische Gesteinskörnungen vorhanden sind. Das Thaumasitbildungspotential im Bindemittelsystem von Gips-Kalk Mörteln steht mit den hydraulischen Komponenten der verwendeten Kalke im Zusammenhang. Anhand des Cementation Index (CI) des Kalkes konnte man das Thaumasitbildungspotential einschätzen und auch kontrollieren. Um zu garantieren, dass die Gips-Kalk Mörtel dauerhaft sind, sollte der CI den Wert von 0,3 nicht überschreiten.

Auf der anderen Seite zeigten die Ergebnisse, dass geringe Mengen an Ettringit und/oder Thaumasit in den Gips-Kalk Mörteln keine Verschlechterung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften und der Verwitterungsresistenz bewirkten. In Gips-Kalk Mörteln, die über 13 Jahre der freien Bewitterung ausgesetzt waren, fanden sich geringe Mengen an Thaumasit, die aber keine Schäden in der Mikrostruktur verursachten.

Leistungsfähigkeit in Bezug auf das gestellte Anforderungsprofil

In wieweit entsprechen nun die entwickelten Instandsetzungsmörtel dem in Kapitel 3.3 gestellte Anforderungsprofil für einen Instandsetzungsmörtel der St. Petri Kirche zu Bosau. Betrachtet werden hierbei die Mörtel der Zusammensetzung gemäß Kapitel 5.4 (Tabelle 8).

Aufgrund des möglichen Thaumasitbildungspotentials werden die Ergebnisse der Mischungen mit PC54 (CL 90) betrachtet. Der errechnete CI von 0,012 sollte gewährleisten, dass kein Bildungspotential vorliegt.

Durch die Verwendung kommerzieller Produkte war eine ausreichende Verfügbarkeit mit entsprechender Qualitätskontrolle gewährleistet.

An die Verwitterungsresistenz der entwickelten Instandsetzungsmörtel wurde die primäre und höchste Priorität gestellt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Instandsetzungsmörtel dieser gestellten Anforderung entsprachen, sowie 20-30 M.-% Kalkhydrat im Bindemittelanteil enthalten waren. Damit konnte auch der geforderte Bindemittelgehalt von ≥ 70 M.-% an CaSO_4 -Komponenten eingehalten werden. Durch die Verwendung der abbindeverzögernden Weinsäure konnte auch die Verarbeitungszeit von ca. 1 h eingehalten werden.

Bezüglich der Festigkeit war ein Wert von ca. 12 N/mm^2 gefordert. Im Vergleich mit den 28 Tage Festigkeiten der entwickelten Mörtel (siehe hierzu Tabelle A6.1 im Anhang) kam die Mischung (80/0/20)PC54 mit einer Druckfestigkeit von 10 N/mm^2 dem am nächsten. Auch die Rohdichte von $1,83 \text{ g/cm}^3$ entsprach dem geforderten Wert von ca. $1,8 \text{ g/cm}^3$.

Betrachtet man sich nun die Gesamtporosität der Mischung (80/0/20)PC54, so wurde die geforderte Porosität von ca. 25 Vol.-% annähernd erreicht. Die Gesamtporosität für die ausgewählte Mischung lag bei 23,4 Vol.-% (4,7 Vol.-% Luftporen, 17,8 Vol.-% Kapillarporen und 0,9 Vol.-% Gelporen). Der geringe Gehalt an Kapillarporen bewirkte dementsprechend einen niedrigen Wasseraufnahmekoeffizienten von $3,4 \text{ kg/m}^{2*}\sqrt{\text{h}}$, der dem geforderten Wert von $< 10 \text{ kg/m}^{2*}\sqrt{\text{h}}$ entsprach.

Eine Ausblühneigung und eine Schädigung durch Frost-Tau-Wechsel konnte nicht festgestellt werden.

So kann als Empfehlung für die Instandsetzung der St. Petri Kirche zu Bosau die Mörtelmischung (80/0/20)PC54 angegeben werden.

Allgemeine Vorgehensweise

Zur Verdeutlichung einer allgemeinen Vorgehensweise am Bauwerk soll der im Folgenden angegebene Entscheidungsbaum dienen (Bild 94).

Die objektspezifischen Anforderungen wie der dynamische E-Modul, die Festigkeit, die Dichte, die Wasseraufnahme und die Porosität werden durch umfangreiche Untersuchungen des Altmaterials am Objekt herausgearbeitet. Der

Instandsetzungsmörtel wird in einem folgenden Schritt an diese Anforderungen angepasst.

Die Verarbeitbarkeitszeit, das Wasserrückhaltevermögen, die Ausblühneigung und der Widerstand gegen Schädigungen durch Frost-Tau-Wechsel werden im Bild 94 als allgemeine Anforderungen bezeichnet. Diese sind für die Instandsetzung historischer Bauwerke mit calciumsulfatgebundenen Mörteln vom Objekt unabhängig einzuhalten.

Zusammengefasst ergeben die allgemeinen Anforderungen und die objektspezifischen Anforderungen ein auf das jeweilige Bauwerk individuell angepasstes Anforderungsprofil. Aufbauend auf diesem Anforderungsprofil wird eine geeignete Mischung für den Instandsetzungsmörtel ausgewählt.

Werden die genannten Vorgaben der vorherigen detaillierten Untersuchung des Objektes und die Aufstellung eines an das Bauwerk angepassten Anforderungsprofils eingehalten, kann ein geeigneter Instandsetzungsmörtel gewählt werden. Dies sollte dann ermöglichen, dass die Instandsetzungen erfolgreich vorgenommen werden können und die Mörtel auch über Jahre den ihnen gestellten Bedingungen standhalten.

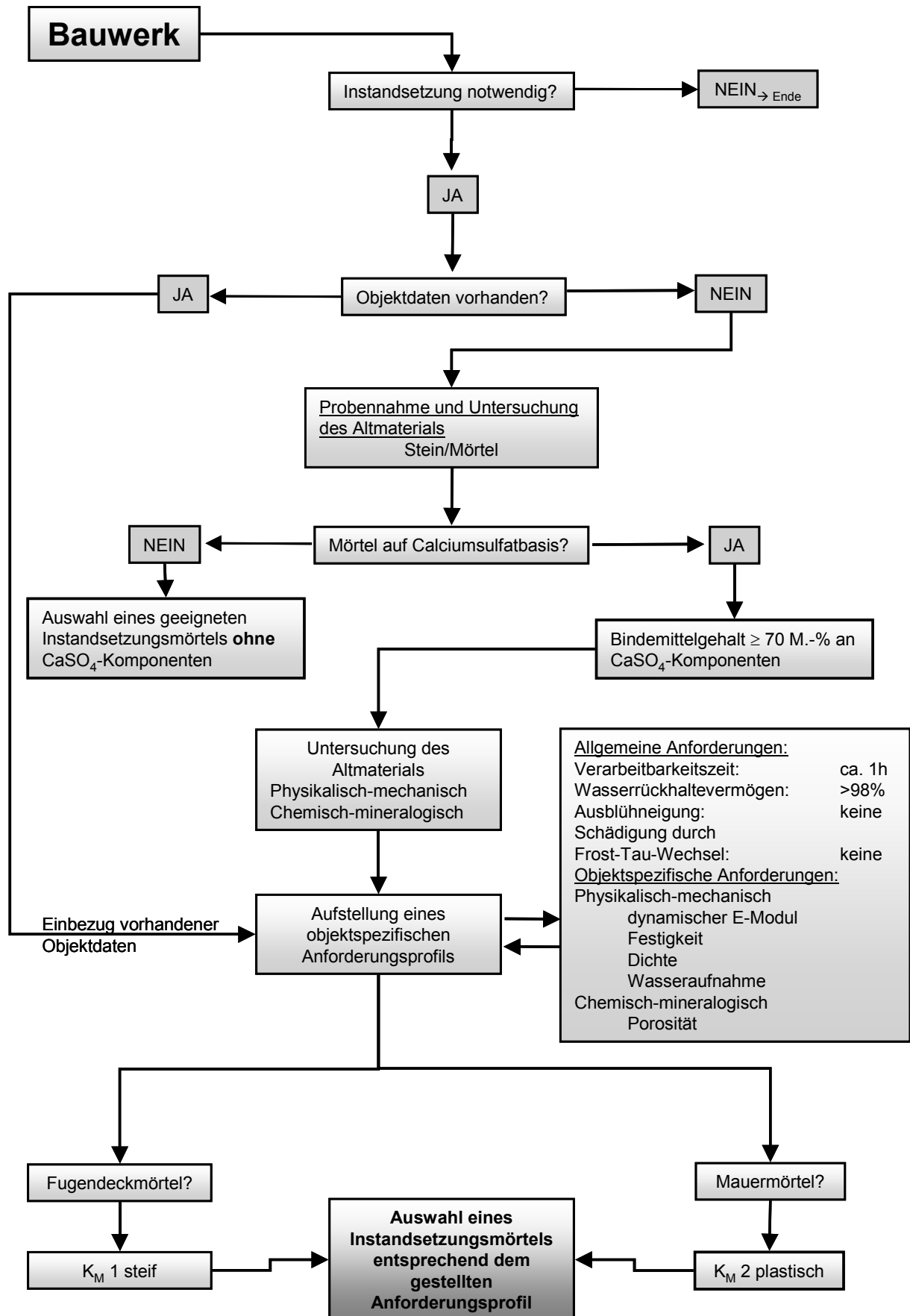


Bild 94: Allgemeine Vorgehensweise zur Auswahl eines Instandsetzungsmörtels

Mörtelbaukasten

Betrachtet man die in dieser Arbeit entwickelten und optimierten Mörtelmischungen, so kann man diese mit dem in Bild 93 dargestellten Entscheidungsbaum verknüpfen.

In folgender Tabelle 13 sind diese Mörtelmischungen angegeben mit:

Tabelle 13: Mörtelmischungen

	Probebezeichnung	20/50/30	40/30/30	60/10/30	80/0/20
		CL 90	CL 90	CL 90	CL 90
	Bindemittel : Zuschlag	1:4	1:4	1:4	1:3,5
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	20	40	60	80
	β -Halbhydrat [M.-%]	50	30	10	
	Anhydrit [M.-%]				
	Kalkhydrat	30	30	30	20
Gesteinsk. (100%)	KSM [M.-%]	3,75	3,75	3,75	3,75
	QS 0,6 [M.-%]	15,75	15,75	15,75	15,75
	KBS 1 [M.-%]	60,00	60,00	60,00	60,00
	KBS 2 [M.-%]	15,50	15,50	15,50	15,50
	QS 4 [M.-%]	5,00	5,00	5,00	5,00
	Weinsäure* ¹	X	X	X	X

1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

Die in Bild 94 angegebenen allgemeinen Anforderungen halten diese Mörtelmischungen, wie die Untersuchungen gezeigt haben, ein. Die objektspezifischen Anforderungen wie die Festigkeit, die Dichte, der dynamische E-Modul, die Wasseraufnahme und die Porosität lassen sich durch die Änderung des Verhältnisses von α -HH zu β -HH in den Bindemittelkomponenten variieren.

Damit ist es möglich, anhand der in Tabelle 13 angegebenen Mischungen einen geeigneten Instandsetzungsmörtel nach Aufstellung eines objektspezifischen Anforderungsprofils auszuwählen. Die entwickelten Mörtelmischungen lassen sich somit vergleichbar eines Baukastens auf ein beliebiges historisches Bauwerk, das mit calciumsulfatgebundenen Materialien errichtet wurde, für nötige Instandsetzungen einsetzen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung von Untersuchungsergebnissen historischer Gips- und Gips-Kalk Mörtel aus der Literatur [3, 4, 8, 10] und eigenen Untersuchungsergebnissen führte zu der Aufstellung eines allgemeinen Anforderungsprofils. Aus der Tatsache heraus, dass bestimmte Eigenschaften, wie Festigkeit und Porosität, eines Mörtels immer auf das jeweilige Objekt abgestimmt sein müssen, wurde am Beispiel der St. Petri Kirche Bosau ein objektspezifisches Anforderungsprofil erstellt. Dieses Anforderungsprofil war Grundlage für die Anpassung der jeweiligen Eigenschaften der Instandsetzungsmörtel.

Die Erkenntnisse über die Hydratations- und Gefügemodelle gaben Aufschluss darüber, inwieweit sich die Eigenschaften der Mörtel durch eine Variation der Parameter beeinflussen lassen. So wurde die Kombination von α -HH und β -HH innerhalb einer Mischung gezielt genutzt, um die Porosität und die Festigkeit der Mörtel objektspezifisch einstellen zu können. Der Einsatz von Additiven wie Abbindeverzögerer beeinflusst die Gefügestruktur dahingehend, dass sich Tracht und Habitus der Kristalle verändert, was sich wiederum auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften auswirkt. Dies wurde genutzt, um die Instandsetzungsmörtel gezielt auf die Anforderungen einzustellen.

Mit diesem Wissen konnten die bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Mörtel optimiert werden. Durch die zusätzliche Zugabe eines Quarzsandes wurde die Sieblinie verändert und das Bindemittel/Zuschlag- Verhältnis wurde von 2:1 auf 1:4, 1:3,5 und 1:2 verändert. Diese Änderungen bewirkten, dass sich die physikalisch-mechanischen Eigenschaften veränderten, ohne die Verwitterungsresistenz der Mörtel zu verschlechtern.

In einem weiteren Schritt wurde den Mörteln zur Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens Methylcellulose zugegeben. Das Ziel, das Wasserrückhaltevermögen zu erhöhen, wurde damit erreicht. Auch dadurch wurde die Verwitterungsresistenz der Mörtel nicht beeinträchtigt.

Die chemisch-mineralogischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Thaumasit und/oder Ettringit in Gips-Kalk Mörteln bilden können, wenn sich niedrige Temperaturen einstellen und in den Mörteln hydraulische Komponenten im Kalk und carbonatische Gesteinskörnungen vorhanden sind. Dabei zeigte sich, dass das Thaumasitbildungspotential im Bindemittelsystem von Gips-Kalk Mörteln direkt mit

den hydraulischen Komponenten der verwendeten Kalke im Zusammenhang steht. Anhand des Cementation Index (CI) der einzelnen Kalke ließ sich das Thaumasitbildungspotential einschätzen und kontrollieren.

Um die Verwitterungsbeständigkeit von Calciumsulfat-gebundenen Mörteln zu erhöhen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine Möglichkeit davon ist der Gebrauch des komplexen Systems von Gips-Kalk Mörteln, die durch das Anlösen und wieder Auskristallisieren des Gipses ein dichteres Gefüge und schließlich eine geringere Porosität bewirken. Bei Betrachtung unterschiedlich feuchtebeanspruchter Mörtelproben konnten diese Aussagen bestätigt werden. Vorhandene Poren wurden mit der Zeit im oberflächennahen Bereich verschlossen. Durch den Vergleich der Porositäten konnte eine Abnahme der Kapillarporen bei gleichzeitiger Zunahme der Gelporen beobachtet werden.

Es wurde deutlich, dass die Mörtel nicht nur einsetzbar sind aufgrund ihrer guten Verwitterungsresistenz; sondern auch aufgrund ihrer Verträglichkeit mit der Originalsubstanz wegen der gewählten Ausgangsstoffe. Die Variation des unterschiedlichen Verhältnis von α -HH zu β -HH ermöglichte eine objektspezifische Anpassung geforderter Eigenschaften.

Durch An- und Umkristallisationen über die Zeit werden sich die Mörtel noch weiter verdichten und sich damit die Verwitterungsresistenz noch weiter erhöhen. Offen bleibt, in wie weit sich die Oberfläche verdichten wird und ob sich diese Verdichtung einem kritischen Punkt nähert. Wird die Oberfläche zu dicht, so dass kein Feuchteaustausch von Innen nach Außen mehr möglich wäre, wären Absprengungen der obersten Mörtelschicht die Folge. Dazu fehlen Langzeituntersuchungen. Es bietet sich an, die Testmauern der Freibewitterung weiterhin zu beobachten und zu untersuchen. Auch die applizierten Testflächen an den Objekten sollten weiterhin beobachtet, beprobt und untersucht werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] **Livingston, R.A.; Wolde-Tinsea, A.; Chaturbahai, A.:** The Use of Gypsum Mortar in Historic Buildings. Structural Repair and Maintenance of Historic Buildings II, Eds. C.A. Brebbia, J. Dominguez & F. Escrig, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, Vol. 1, 1991, 157-165
- [2] **Tesch, V.; Vellmer, C.:** Instandsetzung von Naturstein- und Ziegelmauerwerk mit Gipsmörtel. Tagungsband der 2. Kasseler Baustoff- und Massivbautage, Herausgeber Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt und Prof. Dr.-Ing. E. Fehling, 2002, S. 13
- [3] **Middendorf, B.:** Charakterisierung historischer Mörtel aus Ziegelmauerwerk und Entwicklung von wasserresistenten Fugenmörteln auf Gipsbasis. Universität-GH-Siegen, Dissertation, 1994.
- [4] **Lucas, H.G.:** Gips als historischer Außenbaustoff in der Windsheimer Bucht – Verbreitung, Gewinnung und Beständigkeit im Vergleich zu anderen Natursteinwerken. Dissertation, 1992, RWTH Aachen.
- [5] **Steinbrecher, M.:** Gipsestrich und –mörtel: Alte Techniken wiederbeleben-verlorenes Wissen erschwert Instandsetzung. Bausubstanz, Jg. 8, 10, 1992, S. 59-61.
- [6] **Steinbrecher, M.:** Historische Gipsmörtel und Gipsestriche. Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt, Jg. 2, 1994, S. 127-133.
- [7] **Tesch, V.; Middendorf, B.:** Occurrence of thaumasite in gypsum lime mortars for restoration, In: Cement and Concrete Research, 36 (2006), 1516-1522.
- [8] **Arens, P.:** Untersuchung und Entwicklung von Gipsmörteln für den Außenbereich unter besonderer Berücksichtigung der Wasserresistenz, Dissertation Universität-GH-Siegen, 2002.
- [9] **Gips- Datenbuch:** Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V., Darmstadt, 2003
- [10] **Weichmann, M.J.:** Historische Gipsmörtel in Deutschland: Mineralogische, chemische und physikalische Eigenschaften, Ableitung der Brennprozesse

- und Rezepturen, Wechselwirkung mit Werksteinen. TU Clausthal, Dissertationen, 1998.
- [11] **Vogel, D.:** Historische Gipse, Charakterisierung hinsichtlich des Ordnungszustandes der Kristallite und ihre Nachstellung. TU Clausthal, Dissertation, 1999
- [12] **Oetzel, M.:** Untersuchung der Phasenbeziehungen im System $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$. RWTH Aachen, Dissertation, 1999.
- [13] **Oetzel, M.; Heger, G.; Koslowski, T.:** Einfluss von Umgebungsfeuchte und Temperatur auf die Phasenumwandlung im System $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$. ZKG International, Band 53, Nr.6, 2000, S. 354-361
- [14] **Manns, W.:** Anhydrit-Gips. Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Begriffen. Fliesen und Platten, 11, 1990, S. 87
- [15] **Wirsching, F.:** Calcium- Sulfate, in Ullmann's Encyclopaedia of industrial chemistry, Vol. A4, VHC Verlag Weinheim, 1985
- [16] **Henes, U.; Althaus, E.:** Zur Verträglichkeit moderner und historischer Mörtel. Sonderforschungsbericht 315, in: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, ISBN 3-433-01080-3, 1987, S. 284-291
- [17] **Knöfel, D.; Schubert, P.:** Mörtel und Steinerfüllungsmittel in der Denkmalpflege. Handbuch. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege; Verlag Ernst & Sohn, Berlin; 1993.
- [18] **Stark, J.; Stürmer, S.:** Bauschädliche Salze. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger- Institut für Baustoffkunde, Universitätsverlag Bauhaus Universität, Heft 103, 1996, 51 S.
- [19] **Stark, J.; Stürmer, S.:** Dauerhaftigkeit von Beton. Serie Baupraxis, F.A. Finger Institut für Baustoffkunde Weimar, Birkhaeuser Verlag, Basel, ISBN 3-7643-6344-4, 2001, 340 S.
- [20] **Hempel, R.:** Treibmineralbildung in historischem Mauerwerk. Bautenschutz und Bausanierung, Nr. 16, 1993, S. 49-52
- [21] **Mulenga, M.:** Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumasitbildung. Bauhaus Universität Weimar, Dissertation, 2002

-
- [22] **Jacobson, S. D.; Smyth, J. R. ;Swope, R. J. :** Thermal expansion of hydrated six-coordinate silicon in thaumasite. Springer Verlag, 2003.
- [23] **Stark, J.; Wicht, B.:** Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag, Basel, 2000.
- [24] **Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStB):** Sulfatangriff auf Beton-Stellungnahme des DAfStB, Berlin, 2003.
- [25] **Torres, S. M., Kirk, C. A., Lyndsdale, C. J., Swamy, R. N., Sharp, J. H.:** Thaumasite-etingite solid solutions in degraded mortars. Cement and Concrete Research 34; 2004; pp. 1297 – 1305
- [26] **Zeisig, A.; Lepper, J.:** Naturgipsvorkommen in Niedersachsen; Abschlussbericht des DBU Projektes „Optimierung und Erprobung dauerhafter Gipsmörtel für die Instandsetzung umweltgeschädigter historischer Bauwerke“, 2005, erschienen bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
- [27] **Rauschenbach, F.:** Zur Wirkung und Bestimmung organischer Zusätze in Kalk- Gipsmörteln. Karlsruhe, Dissertation, 1993.
- [28] **Lucas, G.:** Hochbrandgips im Außenbereich historischer Gebäude? Ein Plädoyer für Gips. ZKG International, Heft 08/09, Band 55, 2003, S. 78-86
- [29] **Bosbach, D.; Middendorf, B.; Schmidt, M.:** Mikroskopische Kristallisationsprozesse und makroskopische Materialkennwerte von CaSO_4 -Phasen: Oberflächenreaktivität, Reaktionskinetik und Gefügeeigenschaften. Zwischenbericht, Projekt der DFG, Nummer (MI 478/6-1, MI 478/6-2), 2003, 50 Seiten
- [30] **Middendorf, B.:** Physico-mechanical and microstructural characteristics of historic and restoration mortars based on gypsum: current knowledge and perspective. Geological Society London, Special Publications 205, pp. 165-176, 2002.
- [31] **St. Petri-Kirche in Bosau:** Faltblatt zur Geschichte des Ortes Bosau, Beuroner Kunstverlag, 2001
- [32] **Wiek, P.:** St. Katharinen Hamburg. Große Baudenkmäler Heft 383, Deutscher Kunstverlag München Berlin, 1995

- [33] **Budelmann, H.; Wolter, A.; Middendorf, B.:** Optimierung und Erprobung dauerhafter Gipsmörtel für die Instandsetzung umweltgeschädigter historischer Bauwerke. Forschungsvorhaben der DBU- Az: 18320; 2005.
- [34] **Snethlage, R.:** Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Frauenhofer IRB Verlag, 1997, ISBN 3-8167-4684-5
- [35] **Middendorf, B.; Hughes, J.J.; Callebaut, K.; Baronio, G.; Papayianni, I.:** Investigative methods for the characterisation of historic mortars. Part 1: Mineralogical characterisation. Material and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 38, 10-2005, 282, pp. 761-769.
- [36] **Middendorf, B.; Hughes, J.J.; Callebaut, K.; Baronio, G.; Papayianni, I.:** Investigative methods for the characterisation of historic mortars. Part 2: Chemical characterisation. Material and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 38, 10-2005, 282, pp. 771-780.
- [37] **Romberg, H.:** Zementsteinporen und Betoneigenschaften. Beton-Information, Heft 5, 1978, S. 50-55
- [38] **Micromeritics:** Pore-cor. Operator's Manual, 2000
- [39] **Patentschrift:** DE 197 04 066 C2. Verwendung einer Trockenmischung zur Herstellung eines altmaterialverträglichen Mörtels. Veröffentlichung der Patenterteilung 8.2.2001
- [40] **Niemann, L.:** Die Reaktionskinetik des Gipsabbindens: Makroskopische Reaktionsraten und Mechanismen in molekularem Maßstab. Dissertation; Karlsruher Mineralogische und Geochemische Hefte; Schriftenreihe des Instituts für Mineralogie und Geochemie, Heft 28; 2005
- [41] **Albrecht, W.:** Die Umwandlung von Gips und Anhydrit. Zement-Kalk-Gips, Nr. 10, S. 463-466, 1964.
- [42] **Lehmann, H.; Metha, S.K.:** Einfluss der Kristallitgröße auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften verschiedener Calciumsulfat- Halbhydrate. Tonindustrie Zeitung, Nr. 8; 1973

-
- [43] **Stark, J.; Krug, H.:** Baustoffpraktikum, Band 1, Physikalische Untersuchungen. Schriftreihe des F.A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar, 2000.
- [44] **Boynton, R. S.:** Chemistry and technology of lime and limestone, John Wiley & Sons Inc NY., 1980
- [45] **Russel, J.J.:** Einfluss des Feuchtigkeitshaushaltes auf die Druckfestigkeit kleiner Gipswürfel. Zement-Kalk-Gips, Jg. 13, Heft 8, 1960, S. 345-351.
- [46] **Engelke, H.:** Veränderung mechanischer Eigenschaften von Gipsbaustoffen bei und nach Durchfeuchtung. Zement- Kalk- Gips, Nr. 11, 1979, S. 560-568
- [47] **Henning, O.; Eggert, O.:** Zur feuchtigkeitsbedingten Veränderung von Gipsbaustoffen. ZKG International, Nr. 52, Heft 3, 1999, S.154-159
- [48] **Abraham FSH, Anderson D, Deschamps J, Firth JG, Huismans JW et al:** The Dictionary of Substances and Their Effects. Royal Society of Cemistry, Bugbrooke, Northamptonshire, (UK) Volume 5, 1993, 875 pp, ISBN: 0-85186-351-5
- [49] **McEvoy GK:** AHFS Drug Information. American Society of Hospital Pharmacists Inc, Bethesda (USA); 2363 pp, 1992; ISBN: 1-879907-07-0
- [50] **American Medical Association,** Department of Drugs, Division of Drugs and Technology: Drug Evaluations. American Medical Association, Chicago (USA); 1650 pp, 1986; ISBN: 0-89970-200-7
- [51] **Bellmann, F., Stark, J.:** Ein Beitrag zum Chemismus der Thaumasitbildung. Tagungsband der 15. IBAUSIL des FIB der Bauhaus-Universität Weimar, 2003, Band 2, S. 0659-0667
- [52] **Mall, G.:** Bauschäden. Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1966
- [53] **Rostasy, R. S.:** Baustoffe. Kohlhammer, Stuttgart 1983
- [54] **Weber, H.:** Mauerfeuchtigkeit: Ursachen und Gegenmaßnahmen. Expert Verlag, Sindelfingen, 2. erweiterte Auflage, 1984.
- [55] **Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf und Petzold:** Lehrbuch der Bauphysik. BG Teubner Verlag, Stuttgart, 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage, 1997.

- [56] **Kiessl, K.:** Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Universität Gesamthochschule Essen, Dissertation, 1983.
- [57] **Gösele, Schüle und Künzel:** Schall, Wärme, Feuchte: Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 10. Auflage, 1997.
- [58] **Hohmann, Setzer und Wehling:** Bauphysikalische Formeln und Tabellen – Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz. Werner Verlag, München, 4. Auflage, 2004.
- [59] **Fechner, O.:** WU-Beton im Erdreich. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ. Prof. Dr.-Ing. Horst Falkner.
- [60] **Holm, A. und Venzmer:** WUFI – Modellierung für vier Fallbeispiele. In: Venzmer, H. (Herausgeber): 12. Hanseatische Sanierungstage in Warnemünde: Mauerwerksfeuchtigkeit Grundlagen, Möglichkeiten, Grenzen der Entfeuchtung und typische Fehler. Schriftenreihe – Heft 12. Feuchte und Altbausanierung e.V., Verlag Bauwesen, 2001.
- [61] **Garrecht, H.:** Hygrothermische Wechselwirkung von Naturstein und Mörtelfuge. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 3, 2005, S. 221-229
- [62] **Gertis, K.; Kiessl, K.; Werner, H.; Wolfseher, U.:** Hygrische Transportphänomene in Baustoffen, 1976, Heft Nr. 258; DafStb
- [63] **Balduin, H.:** Differential-thermoanalytische Untersuchungen an alten Ziegeln und Mörteln. ZKG International, 1978
- [64] **Gräf, H.:** Über die Porosität und Durchlässigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton und ihren Einfluss aus Gebrauchseigenschaften von Beton. Universität Essen, Dissertation, 1988
- [65] **Krus, M.:** Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Universität Stuttgart, Dissertation, 1995.
- [66] **Niesel, K.:** Möglichkeiten zur Erfassung des kapillaren Flüssigkeitsaufstiegs in Baustoffen, 1993

-
- [67] **Roesler, H.-J.:** Lehrbuch der Mineralogie. 2. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1980
- [68] **Stürmer, S.; Freyburg, E.; Bastian, K.H.:** Zur Untersuchung und Nachstellung historischer Gips- Kalk- Außenputze im Thüringer Raum. Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus Universität Weimar, Band 44, Heft 1/2, 1998, S. 168-177
- [69] **Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke:** Sonderforschungsbericht 315 der Universität Karlsruhe, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, ISBN 3-433-01633-X, 1995
- [70] **Henning, O.; Rauschenbach, F.:** Die Analyse von chemischen Zusätzen in Gipsprodukten. Zement- Kalk- Gips, Nr. 8, 1990; S. 413-414
- [71] **Nodoushani, M.:** Sanierung historischer Bauwerke aus Naturstein. Bauverlag, Wiesbaden, ISBN 3-7625-3011-4, 1992
- [72] **Mineralkabinett der Universität Bremen:** <http://www.min.uni-bremen.de>
- [73] **Böttger, K. G.:** Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze; Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 1997; ISBN 3-931216-72-1
- [74] **Mosebach, U.:** Wo einst die Grafen von Hohnstein lebten. Piepersche Druckerei und Verlag GmbH, Clausthal- Zellerfeld, 1992
- [75] **Bellmann, F.:** Zur Bildung des Minerals Thaumasit beim Sulfatangriff auf Beton; Dissertation, Bauhaus Universität Weimar, 2005

Liste zitierter Normen

EN 196-1: Prüfverfahren für Zement- Bestimmung der Festigkeit, 1995

DIN EN 459, Teil 1: Baukalk: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien, 2001

DIN EN 1015-1: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung (durch Siebanalyse); 1998

DIN 1053, Teil 1: Mauerwerk, Berechnung und Ausführung, 1996

DIN 1168, Teil 2: Baugipse. Anforderungen, Prüfung, Überwachung.

DIN 12524: Baustoffe und –produkte –Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften- Tabellierte Bemessungswerte. 2000.

DIN 52450: Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe; Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern, 1985

DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit; 2001.

DIN EN ISO 15148: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, 2002.

DIN EN ISO 9277: Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach dem BET-Verfahren, 2003.

DIN 66133: Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion, 1993.

DIN 185855, Teil 1: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Allgemeines, Probenahme, Prüfmörtel, 1982

DIN 18555, Teil 2: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts, 1982

DIN 18555, Teil 3: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel, Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte, 1982

DIN 18555, Teil 7: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Frischmörtel; Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens nach dem Filterplattenverfahren, 1987

DIN 18555, Teil 9: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln. Festmörtel, Bestimmung der Fugendruckfestigkeit, 1999

8 Anhang

A 1 Liste der Abkürzungen

Tabelle A 1: Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

A	Anhydrit
AN	Anhydritbrechsand (Körnung 0 – 4 mm)
α -HH	α -Halbhydrat
β -HH	β -Halbhydrat
C	Citronensäure
CL 80	Weißkalkhydrat CL 80
CL 90	Weißkalkhydrat CL 90 – Luftkalk
C ₃ A	Tricalciumaluminat
C-S-H	Calcium-Silikat-Hydrat mit variabler Zusammensetzung
C ₃ S ₂ H ₃	Calcium-Silikat-Hydrat
CI	Cementation Index
E-Modul	dynamischer Elastizitäts- Modul
K ₂ SO ₄	Kaliumsulfat
KBS 1,2	Kalkbrechsand (Körnung 0,6 – 1,2 mm)
KBS 2,0	Kalkbrechsand (Körnung 1,2 – 2,0 mm)
KSM	Kalksteinmehl
MC	Methylcellulose
MIP	Quecksilberdruckporosimetrie
NHL 2	Natürlich Hydraulischer Kalk HL 2
QS 0,6	Quarzsand (Körnung 0 – 0,63 mm)
QS 4	Quarzsand (Körnung 2 – 4 mm)
REM	Rasterelektronenmikroskop
WAK	kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient
w/b-Wert	Wasser/Bindemittel-Wert
WRV	Wasserrückhaltevermögen
WS	Weinsäure
(20/65)	Klima bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte
(5/95)	Klima bei 5 °C und 95% relativer Luftfeuchte

A 2 Phasen im System $\text{CaSO}_4\text{--H}_2\text{O}$ und ihre Eigenschaften

Tabelle A 2.1: Phasen im System $\text{CaSO}_4\text{--H}_2\text{O}$

Chemische Formel der Phase	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4 III	CaSO_4 II
Bezeichnung	Calciumsulfat-Dihydrat	Calciumsulfat-Halbhydrat	Anhydrit III	Anhydrit II
Weitere Bezeichnungen	Naturgips Rohgips Gipsstein techn. Gips abgebundener Gips	β - Halbhydrat Stuckgips α - Halbhydrat Autoklavengips	löslicher Anhydrit	Naturanhydrit Rohanhydrit Anhydritstein synthetischer Anhydrit erbrannter Anhydrit
Formen		α - Form β - Form	α -A III β -A III	A-II-s (schwerlöslich) A-II-U (unlöslich) A-II-E (Estrichgips)
Kristallwasser [M.-%]	20,92	6,21	0	0
Dichte [g/cm^3]	2,31	2,619 β 2,757 α	2,580	2,93 – 2,97
Molmasse	172,17	145,15	136,14	136,14
Kristallsystem	monoklin	monoklin	orthorhombisch	orthorhombisch
Härte nach Mohs	2			3,5
Löslichkeit in H_2O bei 20°C [g CaSO_4 /l]	2,05	8,8 β 6,7 α	8,8 β 6,7 α	2,7
Stabilität	< 40°C	metastabil	metastabil	40 – 1180°C
Bildungstemperatur im Laboratorium		β : 45 – 200°C in trockener Luft α : > 45°C	50°C Vakuum 100°C Luft	200 – 1180°C
Bildungstemperatur im technischen Prozess		β : 120 – 180°C in trocken α : 80 - 180°C nass	β : 290°C trocken α : 110°C nass	300 – 900°C A-II-s: 300-500°C A-II-u: 500-700°C A-II-E: > 700°C

(Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e. V. 1995)

A 3 Untersuchungsergebnisse historischer Mörtelproben und Objektbeschreibungen

Phasenanalyse mittels Röntgenbeugungsanalyse

Durch Schätzungen der ermittelten Phasen der Röntgenbeugungsanalyse ist es möglich, Angaben über die Mengenverteilungen der Bestandteile zu machen. Die geschätzten Gehalte werden wie folgt gekennzeichnet:

++++	sehr viel
+++	viel
++	Nebenbestandteil
+	erkennbare Menge
o	nachweisbar

A 3.1 Burgruine Hohnstein

Phasenanalyse mittels Röntgenbeugungsanalyse

Die Anteile der abgeschätzten Mengen sind tabellarisch in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle A 3.1: Phasenzusammensetzung der historischen Proben

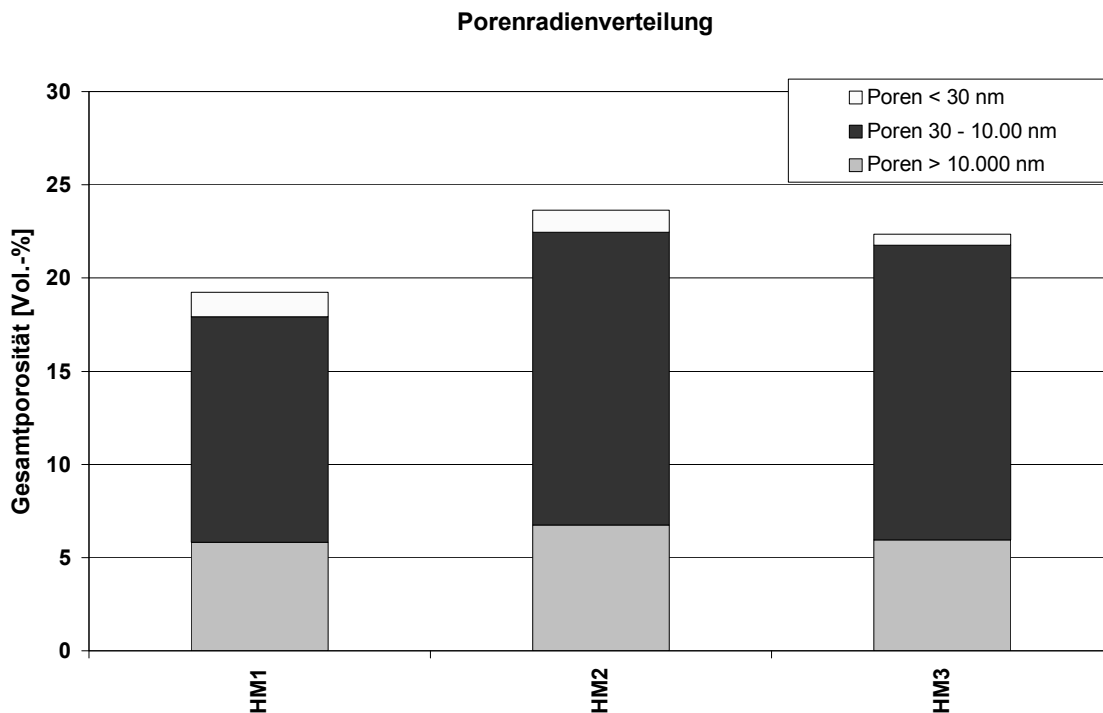
Probe	Phase	Chem. Formel	Anteil
HM1	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	++++
	Anhydrit	CaSO_4	+
	Quarz	SiO_2	+
HM2	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	++++
	Anhydrit	CaSO_4	++
	Quarz	SiO_2	+
	Bassanit	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	+
HM3	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	++++
	Anhydrit	CaSO_4	++
	Quarz	SiO_2	+

Tabelle A 3.2: Mittelwerte der Druckfestigkeiten

Probenbezeichnung	HM1	HM2	HM3
Anzahl der Einzelmessungen	6	6	2
Mittelwert [N/mm ²]	22	13	20

Tabelle A 3.3: Wasseraufnahmekoeffizienten [kg/m²h^{1/2}]

Proben	HM1	HM2	HM3
Anzahl der Einzelmessungen	2	2	1
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h ^{1/2}]	3,4	1,7	4,3

**Bild A 3.1:** Porenradienverteilung der historischen Proben der Burgruine Hohnstein**Tabelle A 3.4:** Daten der Quecksilberdruckporositätsuntersuchungen

Probe	Rohdichte [g/cm ³]	G.Porosität [Vol.-%]	Luftporen [Vol.-%]	Kapillarporen [Vol.-%]	Gelporen [Vol.-%]
HM1	1,8	19,25	5,81	12,10	1,33
HM2	1,8	23,64	6,74	15,71	1,19
HM3	1,8	22,34	5,96	15,81	0,57

A 3.2 St. Petri Kirche, Bosau

Phasenanalyse mittels Röntgenbeugungsanalyse

Die Anteile der abgeschätzten Mengen sind tabellarisch in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle A 3.5: Phasengehalte der als historischer Mörtel entnommenen Proben, (Serie BH)

Probe	Phase	Chem. Formel	Anteil
BH1	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	++++
	Anhydrit	CaSO_4	++
	Quarz	SiO_2	++
BH2	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	++++
	Anhydrit	CaSO_4	++
	Quarz	SiO_2	++
BH3	Quarz	SiO_2	+++
	Calcit	CaCO_3	+++
	Albit	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	++
	Anorthit	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	++
	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	+
BH4	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	++++
	Anhydrit	CaSO_4	++
	Quarz	SiO_2	++
BH5	Quarz	SiO_2	+++
	Microclin	KAlSi_3O_8	++
	Calcit	CaCO_3	++
	Anorthit	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	++
	Ettringit	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$	++

Aufgrund der Analyse kann es sich bei den Proben BH3 und BH5 nicht um historische Gipsmörtel handeln, sondern sind den Instandsetzungsmörteln zuzuordnen. Nur bei den Proben BH1, BH2 und BH4 handelt es sich um historische calciumsulfatgebundene Mörtelproben.

Tabelle A 3.6: Phasengehalte der als Saniermörtel entnommenen Proben
(Serien BB und BZ)

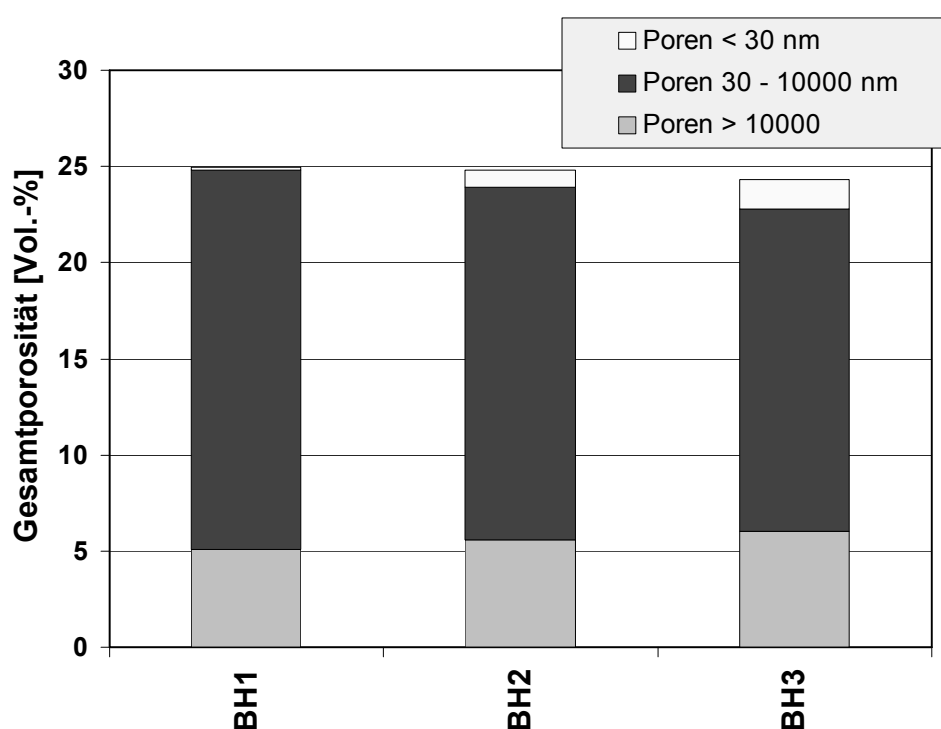
Probe	Phase	Chem. Formel	Anteil
BB1	Quarz	SiO ₂	+++
	Calcit	CaCO ₃	+++
	Anorthit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	++
	Albit	NaAlSi ₃ O ₈	++
BB2	Quarz	SiO ₂	+++
	Calcit	CaCO ₃	+++
	Anorthit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	++
	Albit	NaAlSi ₃ O ₈	++
	Gips	CaSO ₄ *2H ₂ O	+
	Ettringit	3CaO*Al ₂ O ₃ *3CaSO ₄ *30H ₂ O	+
BZ1	Quarz	SiO ₂	+++
	Calcit	CaCO ₃	++
	Anorthit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	++
	Albit	NaAlSi ₃ O ₈	++
	Microclin	KAlSi ₃ O ₈	++
	Gips	CaSO ₄ *2H ₂ O	+
	Ettringit	3CaO*Al ₂ O ₃ *3CaSO ₄ *30H ₂ O	+
	Thaumasit	CaSiO ₃ *CaCO ₃ *CaSO ₄ *15H ₂ O	+

Tabelle A 3.7: Mittelwerte des dynamischen E- Modul in [N/mm²]

Probenbeschreibung	Dynamischer E- Modul [kN/mm ²]
BH1	4,2
BH2	4,1
BH4	5,3

Tabelle A 3.8: Mittelwerte der Druckfestigkeiten in [N/mm²]

Probenbeschreibung	Druckfestigkeit [N/mm ²]
BH1	10,8
BH2	12,3
BH4	12,6

Porenradienverteilung**Bild A 3.2:** Porenradienverteilung der historischen Proben der St. Petri Kirche, Bosau**Tabelle A 3.9:** Daten der Quecksilberdruckporositätsuntersuchungen

Probe	Rohdichte [g/cm ³]	G.Porosität [Vol.-%]	Luftporen [Vol.-%]	Kapillarporen [Vol.-%]	Gelporen [Vol.-%]
BH1	1,8	24,98	5,07	19,74	0,16
BH2	1,7	24,81	5,61	18,33	0,87
BH4	1,8	24,32	6,02	16,79	1,51

Im folgenden werden vier weitere Objekte beschrieben, an denen im Verlauf eines von der DBU geförderten Projektes Testflächen angelegt wurden. Diese Testflächen boten die Möglichkeit, die entwickelten Instandsetzungsmörtel zu applizieren, um diese am Objekt und unter Bewitterung testen zu können.

A 3.3 St. Petri Kirche, Gülzow

Die St. Petri Kirche Gülzow liegt im Dreieck Lauenburg, Schwarzenbeck und Geesthacht. Urkundlich wird Gülzow erstmalig 1230 im Ratzeburger Zehntregister erwähnt. Die jetzige Kirche wurde im Jahr 1819 fertig gestellt.

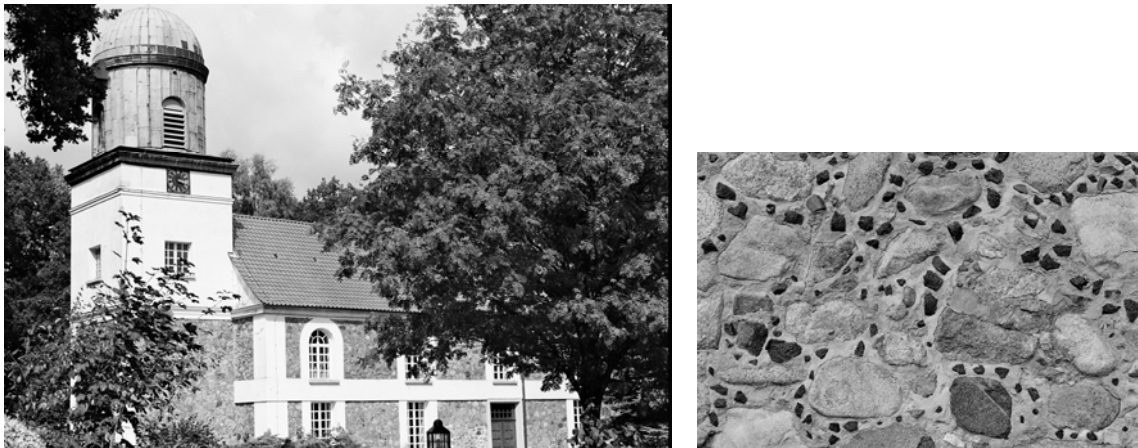


Bild A 3.3: St. Petri Kirche in Gülzow; Gesamtansicht (links) und Detailausschnitt des Fugenmörtels (rechts)

Die St. Petri Kirche Gülzow / Schleswig-Holstein besteht aus Quarzit, Diorit und Granit und einem kalkhaltigen Gipsmörtel. Eine Besonderheit ist hier die Ausführung der Fugenoptik. Die Fugen wurden aufgrund der großen Fugenbreite mit schwarzen Grabsteinsplittern abgemagert. Dies ist im Bild 15 im Detail (rechtes Bild) zu sehen.

A 3.4 St. Katharinenkirche, Hamburg

St. Katharinen ist die drittälteste der Hamburger Hauptkirchen; um 1250 wurde sie auf der Marschinsel Grimm gegründet. Die heutige Kirche wurde im wesentlichen im 14. und 15. Jahrhundert gebaut. Entscheidende Veränderungen an der Kirche, nämlich das mächtige kupfergedeckte Satteldach und der ebenfalls kupfergedeckte

frühbarocke Turmhelm, lassen sich auf das 17. Jahrhundert datieren. Beides wurde nach der Kriegszerstörung 1943/44 in den 50er Jahren originalgetreu (siehe Bild 16) wieder aufgebaut [32].

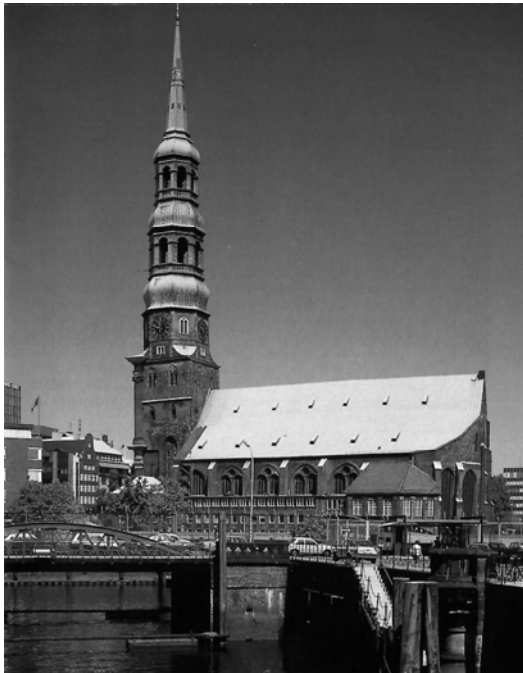


Bild A 3.4: Katharinenkirche Hamburg

Die Kirche wurde im Mittelalter mit Ziegel (Vormauer-Vollziegel „Ellenburg“) und Gipsmörtel errichtet. Der Gipsmörtel findet sich auch heute noch in den alten erhaltenen Mauerwerkskernen. Teile der Verfugung im Außenbereich sind ebenfalls in Gipsmörtel erhalten. Untersuchungen des historischen Mörtels zeigten, dass dieser zu 80 % aus Gips und zu 20 % aus Kalk und Gesteinskörnung besteht. Bei der Gesteinskörnung handelte es sich um Quarz; vereinzelt waren in den Mörteln Partikel an Holzkohle, ein Rest aus dem Brand, nachweisbar.

A 3.5 Kloster Walkenried

Das ehemalige Kloster Walkenried war die dritte Gründung des Zisterzienserordens 1127-1129 auf deutschem Boden. Das Kloster liegt im Südwestharz und war als erste Tochtergründung des Klosters Kamp am Niederrhein eine der ältesten und zeitweise reichsten Zisterzienserabteien in Deutschland mit Ausstrahlung bis ins Baltikum und weit nach Polen hinein. Im 14. Jahrhundert endet durch verschiedene

innere und äußere Einflüsse die Blütezeit der Klosters und dem Kirchengebäude werden durch Krieg und Zerstörung erste große Schäden zugefügt.

Nachdem das Kloster über knapp hundert Jahre eine Lateinschule für Jungen war, erfolgte 1648 die endgültige Säkularisierung¹³ des Klosters. Das Kloster wird als Steinbruch benutzt, die Klausur aber bleibt fast vollständig erhalten. Erste Instandsetzungsmaßnahmen erfolgten um 1900; 1978 – 1989 erfolgen dann in der Trägerschaft des Landkreises Osterode im Harz umfassende und grundlegende Erhaltungsmaßnahmen der gesamten Klosteranlage. Heute noch erhalten ist die frühgotische Klausur mit den Kreuzgängen. Der Kapitelsaal wird heute als evangelische Kirche der Gemeinde genutzt.

Das Kloster Walkenried ist mit Harzer Dolomitstein und Gipsmörtel gemauert.

A 3.6 Johannis Kirche in Katlenburg

Erste urkundliche Erwähnung der „Katlenburg“ (Erwähnung der Weihe eines Hauptaltars einer Klosterkirche) stammt aus dem Jahr 1105. Lange Zeit war Katlenburg ein Kloster, zuerst für Mönche, dann für Nonnen und wurde später eine Domäne. Heute gehört die Kirche zur evangelischen Kirchengemeinde und die Gebäude der alten Domäne dienen als Freizeit- und Bildungsstätte.



Bild A 3.5: Johannis Kirche in Katlenburg

¹³ Umwandlung kirchlicher Besitzungen in staatliche

Der untere Teil der Kirche ist mit Buntsandstein grau und rot und Gipsmörtel verarbeitet (Bild 17).

A 3.7 Dom zu Ratzeburg

Wann genau der Bau des Doms auf der Nordspitze der Insel bei Ratzeburg begonnen wurde, kann nicht gesagt werden; es sind darüber keine Quellenangaben bekannt. Im Vergleich mit dem Bau des Lübecker Doms, dessen Grundsteinlegung im Jahr 1173 war, nimmt man aber an, dass mit dem Bau des Ratzeburger Doms etwa im Jahr 1165 begonnen worden sein muss. Seit 1554 ist der Ratzeburger Dom eine mecklenburgische Kirche und das Bistum Ratzeburg wurde Teil des Herzogtums Mecklenburg. 1918 wird das Großherzogtum Mecklenburg-Strelitz im Zuge der Novemberrevolution zum Freistaat und das Fürstentum Ratzeburg zum Land Ratzeburg.

Der Ratzeburger Dom besteht aus Ziegel mit Gipsmörtel gemauert (Bild 18).



Bild A 3.6: Dom zu Ratzeburg

A 4 Ausgangsstoffe

Tabelle A 4.1: Nomenklatur der verwendeten Materialien

Verwendete Abkürzungen	Material	Artikelbezeichnung	Firma
Bindemittel Gips			
α -HH27	α -Halbhydrat		Fa. A
α -HHW	α -Halbhydrat		Fa. A
β -HH	β -Halbhydrat		Fa. C
A	Anhydrit		Fa. A
Bindemittel Kalk			
CL 80			Fa. E
CL 90			Fa. F
NHL 2			Fa. B
CL 80 S	CL 80 WKH		Fa. G
CL 90 S	CL 90 WKH		Fa. G
PC 50	CL 80		Fa. H
PC 54	CL 90		Fa. H
Gesteinskörnung			
KSM	Kalksteinmehl		Fa. B
QS 0,6	Quarzsand	0 - 0,63 mm	Fa. B
KBS 1,2	Kalkbrechsand	0,6 - 1,2 mm	Fa. B
KBS 2,0	Kalkbrechsand	1,2 - 2,0 mm	Fa. B
QS 4	Quarzsand	2 - 4 mm	Fa. B
AN	Anhydrit	0 - 4 mm	Fa. D
Additive			
WS	Weinsäure		
C	Citronensäure		
K ₂ SO ₄	Kaliumsulfat		
MC	Methylcellulose		

A 4.1 Analysewerte der verwendeten Materialien

α -Halbhydrat

α -27

chemische Durchschnittsanalyse:	Kristallwasser	ca. 6 %
	CaSO ₄	> 92 %
	SiO ₂	0,25 %
	Na ₂ O	0,10 %
	Cl	0,01 %
Reindichte:	2,757 g/cm ³	
Schüttdichte:	1100 ± 100 g/l	
Spezifische Oberfläche (Blaine):	2600 – 3400 cm ² /g	
7-Tage Biegezugfestigkeit:	5 – 12 N/mm ²	
7-Tage Druckfestigkeit:	40 – 60 N/mm ²	

α -HHW

chemische Durchschnittsanalyse:	Kristallwasser	ca. 6 %
	CaSO ₄	> 92 %
	SiO ₂	0,25 %
	Na ₂ O	0,10 %
	Cl	0,01 %
Reindichte:	2,757 g/cm ³	
Schüttdichte:	1200 ± 100 g/l	
Spezifische Oberfläche (Blaine):	1000 - 1100 cm ² /g	
7-Tage Biegezugfestigkeit:	5 – 12 N/mm ²	
7-Tage Druckfestigkeit:	45 – 80 N/mm ²	

β -Halbhydrat

Reindichte:	2,6 – 2,7 g/cm ³
Schüttdichte:	0,7 kg/dm ³
Spezifische Oberfläche (Blaine):	ca. 3000 - 3400 cm ² /g
7-Tage Biegezugfestigkeit:	ca. 3 N/mm ²
7-Tage Druckfestigkeit:	ca. 12,5 N/mm ²

Anhydrit

chemische Durchschnittsanalyse:	CaSO ₄	> 92 %
	SiO ₂	< 2 %
	CaO _{frei}	< 1 %
	Cl	< 0,01 %
Reindichte:	2,93 g/cm ³	
Schüttdichte:	1300 g/l	
Spezifische Oberfläche (Blaine):	3000 – 5000 cm ² /g	
24-Stunden Biegezugfestigkeit:	> 5 N/mm ²	
28-Tage Biegezugfestigkeit:	> 8 N/mm ²	
24-Stunden Druckfestigkeit:	> 30 N/mm ²	
28-Tage Druckfestigkeit:	> 50 N/mm ²	

Analysedaten CEM I 52,5 R

Bindemittelprüfung gem. DIN 1164/18506/EN 196/EN 197/EN 413/EN 459 und nach werksinternen Prüfvorschriften:

Mahlfeinheit Rückst. 630 µm	%	Eindringmaß	mm
Mahlfeinheit Rückst. 200 µm	0,0 %	LP - Gehalt %	%
Mahlfeinheit Rückst. 90 µm	0,0 %	Raumbest. - Kochprobe	
Mahlfeinheit Rückst. 63 µm	%	Raumbest. - Le Chatelier	0,4 mm
Blaine-Wert	7125 cm ² /g	HÜS/Traß/FA/K'stein	%
Spez.-Gewicht	g/cm ³	Hydratationswärme	J/g
Schüttgewicht	kg/dm ³	Weißgehalt	46,9 %
Wasseranspruch (NST)	38,8 %	Glühverlust	1,3 %
Erstarren - Anfang	130 Min.	CO ₂	0,9 %
Erstarren - Ende	175 Min.	SO ₃	3,4 %
f. Erstarren - W/B	cm		
Wasser zum Mörtel	%		
Ausbreitmaß	mm	Bedarfsmenge	kg/m ³

Festigkeiten:

Biegezugfestigkeiten in N/mm ² nach						Druckfestigkeiten in N/mm ² nach					
	1 Tag	2 Tage			28 Tage		1 Tag	2 Tage			28 Tage
	7,1	8,2			9,6		41,7	55,6			74,9

Bemerkungen:

Vorgenannte Werte sind Mittelwerte, die den üblichen Produktionsschwankungen unterliegen.

Chemische und mineralogische Zusammensetzung:

Glühverl.	[1,3]	%
Unl.-Rückst.	[0,5]	%
SiO ₂	22,8	%
Al ₂ O ₃	3,7	%
TiO ₂	0,2	%
Mn ₂ O ₃	0,0	%
P ₂ O ₅	0,1	%
Fe ₂ O ₃	1,4	%
CaO	66,1	%
MgO	0,7	%
SO ₃	3,4	%
S		%
K ₂ O	0,7	%
Na ₂ O	0,2	%
PbO		%
ZnO	0,0	%
Cl	< 0,1	%
Rest	0,7	%

Summe	100,0	%
--------------	-------	---

Ca-M	2,3	
Si-M	4,5	
T-M	2,7	
P ₁		
P ₂		
P ₃		
F-III		
Kalkstandard	92,4	
fr. CaO	0,6	%
C ₃ S	59,7	%
C ₂ S	20,2	%
C ₃ A	7,5	%
C ₄ AF	4,2	%
C ₂ F		%
Na ₂ O-Äquiv.	0,7	%

H ₂ O	%
Hydratwasser	%
CaSO ₄ ·2H ₂ O	%
CaSO ₄	%
CaCO ₃	%
CO ₂	%
Spez.-Gewicht	g/cm ³
Blaine-Wert	cm ² /g
HÜS/Traß/FA/K'stein	%
Schüttgewicht	kg/dm ³

Bemerkungen:

Vorgenannte Werte sind Mittelwerte, die den üblichen Produktionsschwankungen unterliegen.

A 5 Laborversuche

A 5.1 Verwitterungsresistenz

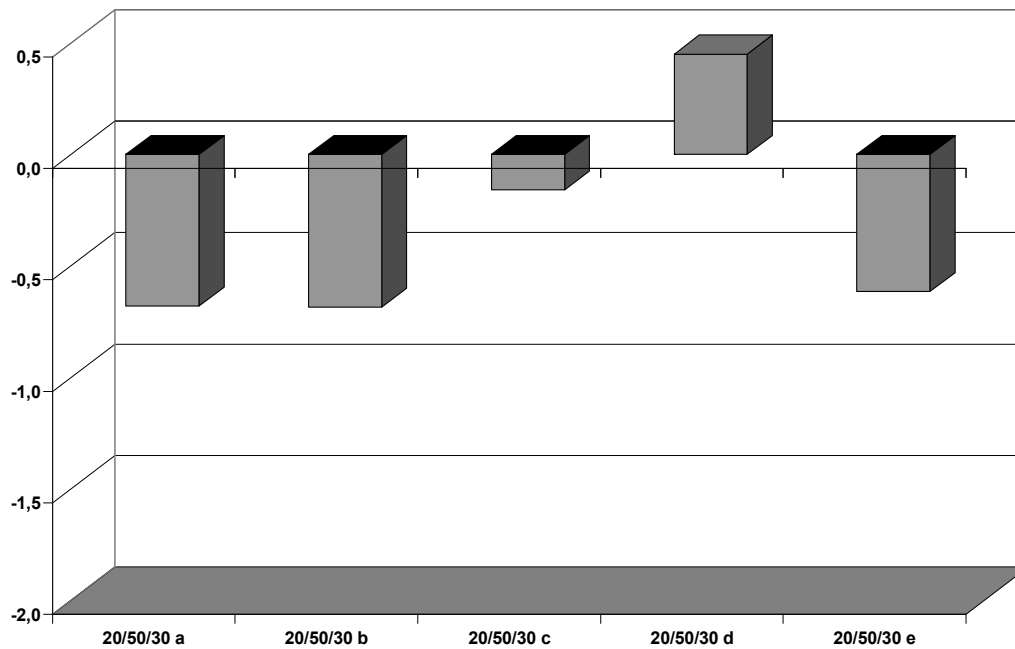


Diagramm A 5.1.1: Veränderung der Masse in [%] nach Verwitterungsversuchen im Labor bezogen auf 100 [%] der Ausgangsmasse, Mischung mit Kalkhydrat CL 90 und α -HH27

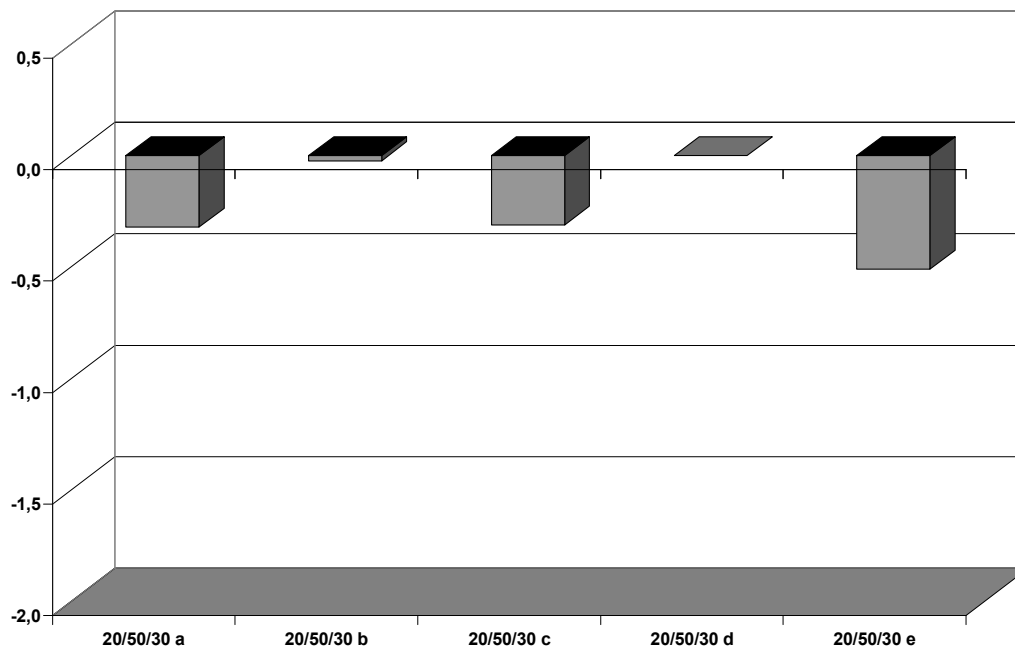


Diagramm A 5.1.2: Veränderung der Masse in [%] nach Verwitterungsversuchen im Labor bezogen auf 100 [%] der Ausgangsmasse, Mischung mit Kalkhydrat CL 80 und α -HH27

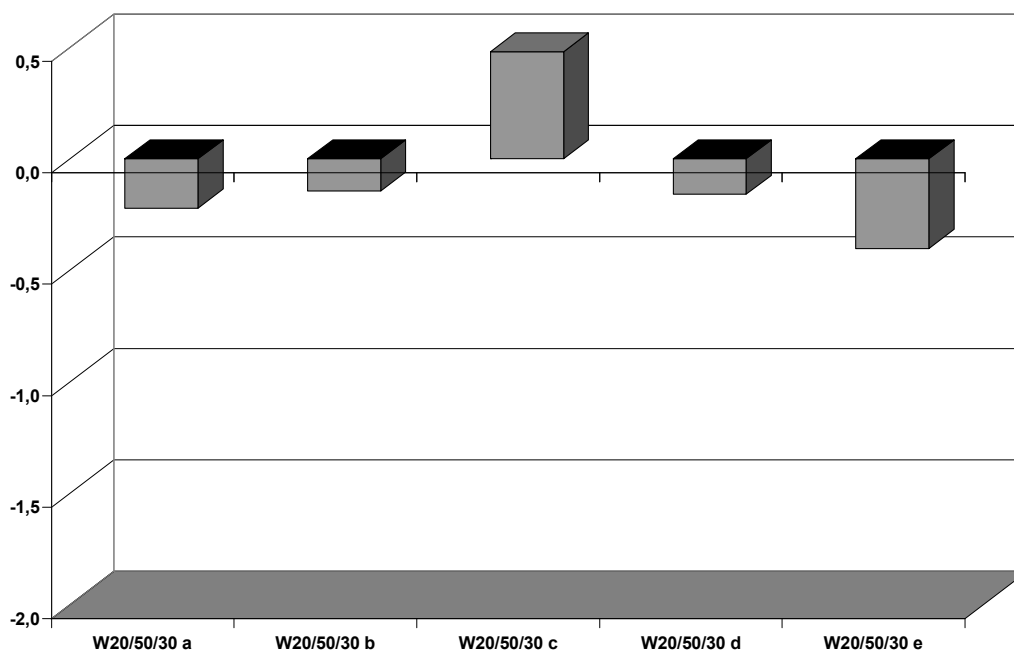


Diagramm A 5.1.3: Veränderung der Masse in [%] nach Verwitterungsversuchen im Labor bezogen auf 100 [%] der Ausgangsmasse, Mischung mit Kalkhydrat CL 90 und α -HHW

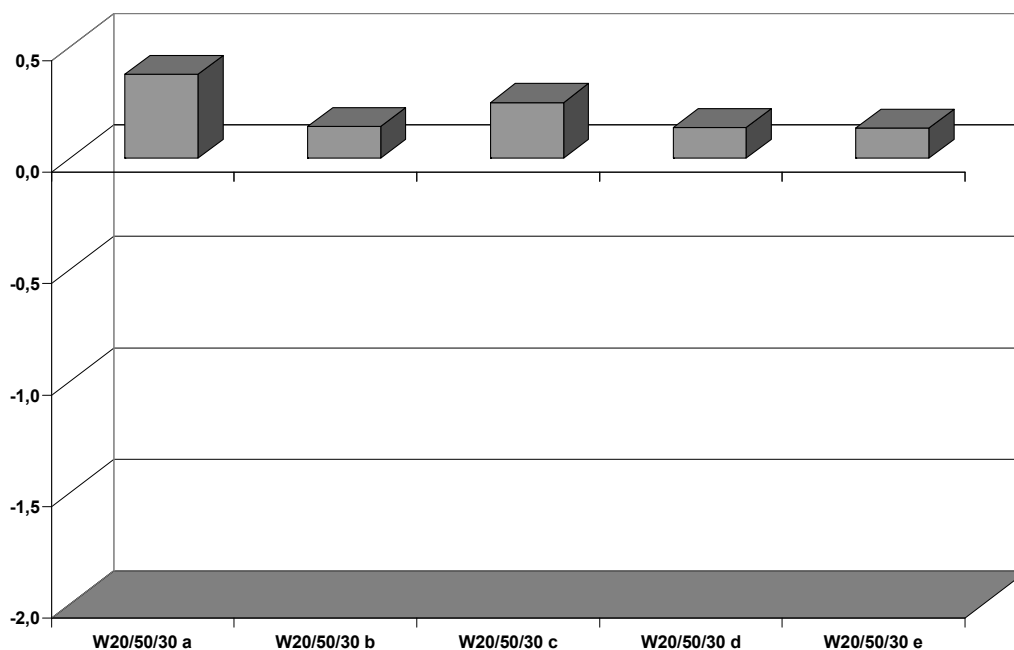


Diagramm A 5.1.4: Veränderung der Masse in [%] nach Verwitterungsversuchen im Labor bezogen auf 100 [%] der Ausgangsmasse, Mischung mit Kalkhydrat CL 80 und α -HHW

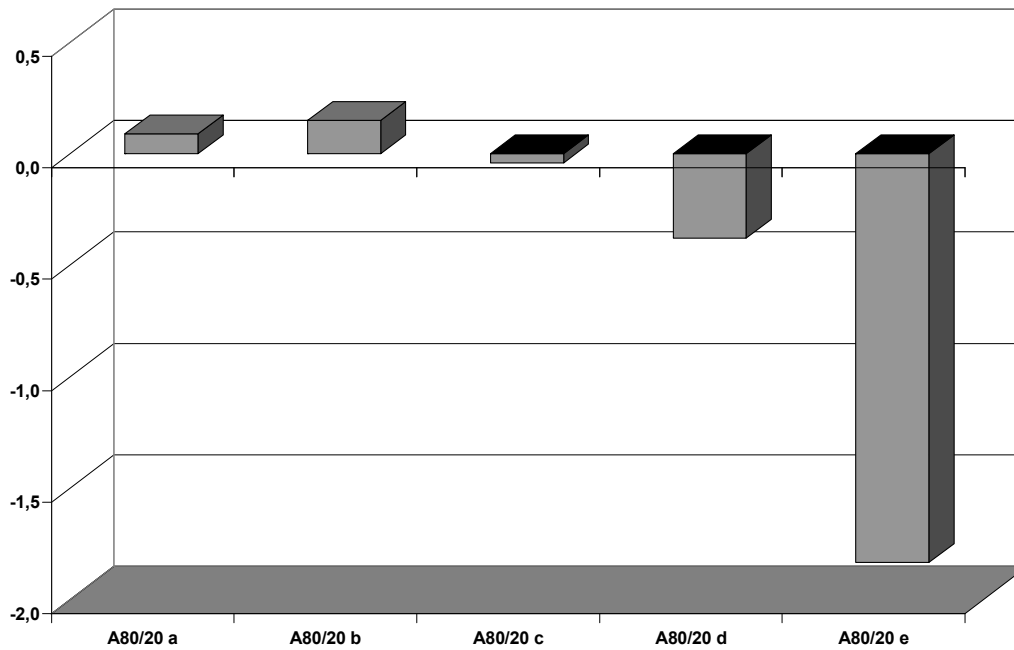


Diagramm A 5.1.5: Veränderung der Masse in [%] nach Verwitterungsversuchen im Labor bezogen auf 100 [%] der Ausgangsmasse, Mischung mit Kalkhydrat CL 90

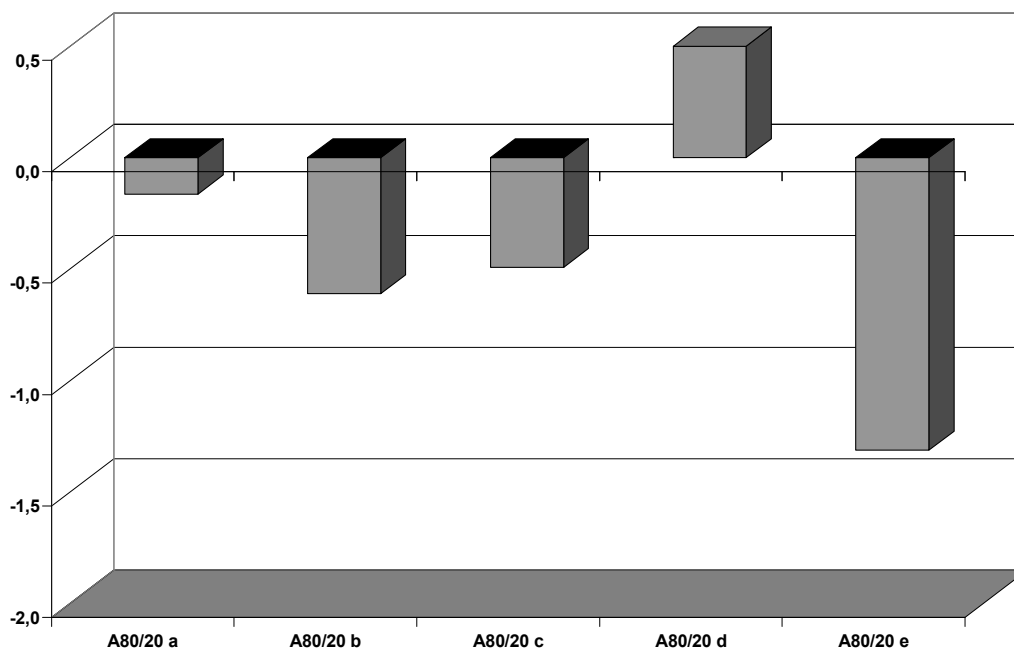


Diagramm A 5.1.6: Veränderung der Masse in [%] nach Verwitterungsversuchen im Labor bezogen auf 100 [%] der Ausgangsmasse, Mischung mit Kalkhydrat CL 80

Tabelle A 5.1.1: Zwischenmischungen der Vorversuche II

Probebezeichnung		0/70/30	10/60/30	20/50/30	30/40/30	40/30/30	50/20/30	60/10/30	70/0/30
Bindemittel : Zuschlag		2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]		10	20	30	40	50	60	70
	β -Halbhydrat [M.-%]	70	60	50	40	30	20	10	
	Anhydrit [M.-%]								
	CL80 [M.-%]	30	30	30	30	30	30	30	30
Gesteinsk. (100%)	KSM [M.-%]	50	50	50	50	50	50	50	50
	QS 0,6 [M.-%]								
	KBS 1 [M.-%]	25	25	25	25	25	25	25	25
	KBS 2 [M.-%]	25	25	25	25	25	25	25	25
	QS 4 [M.-%]								
Additiv	Weinsäure ^{*1}	X	X	X	X	X	X	X	X
	Kaliumsulfat ^{*2}								
Wasser/Bindemittel-Verhältnis		0,55	0,53	0,51	0,49	0,48	0,48	0,40	0,36

^{*1} 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

^{*2} 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

A 5.2 Optimierung der Sieblinie

Tabelle A 5.2.1: Mischungen zur Optimierung der Sieblinie

	Probebezeichnung	80/0/20	80/0/20-1	80/0/20-2	K 80/0/20
	Bindemittel : Zuschlag	2:1	1:1	1:4	1:3,5
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]	80	80	80	80
	β -Halbhydrat [M.-%]				
	Anhydrit [M.-%]				
	Kalkhydrat	20	20	20	20
Gesteinsk.	KSM [M.-%]	50	15,00	3,80	3,75
	QS 0,6 [M.-%]				15,75
	KBS 1 [M.-%]	25	17,60	31,45	60,00
	KBS 2 [M.-%]	25	52,00	59,75	15,50
	QS 4 [M.-%]		15,40	5,00	5,00
Additiv	Weinsäure* ¹	X	X	X	X
	Kaliumsulfat * ²				
	Wasser/Bindemittel-Verhältnis	0,34	0,46	0,59	0,63

*¹ 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

Tabelle A 5.2.2: Mischungen zur Optimierung der Sieblinie

	Probebezeichnung	A80/20	A80/20-1	A80/20-2	K A80/20
	Bindemittel : Zuschlag	2:1	1:1	1:2	1:2
Bindemittel (100%)	α -Halbydrat [M.-%]				
	β -Halbhydrat [M.-%]				
	Anhydrit [M.-%]	80	80	80	80
	Kalkhydrat	20	20	20	20
Gesteinsk.	KSM [M.-%]	50	15,00	3,80	3,75
	QS 0,6 [M.-%]				15,75
	KBS 1 [M.-%]	25	17,60	31,45	60,00
	KBS 2 [M.-%]	25	52,00	59,75	15,50
	QS 4 [M.-%]		15,40	5,00	5,00
Additiv	Weinsäure* ¹				
	Kaliumsulfat * ²	X	X	X	X
	Wasser/Bindemittel-Verhältnis	0,38	0,42	0,51	0,52

*¹ 1 ‰ Weinsäure bezogen auf den Anteil an α -HH + β -HH

*² 7,5 ‰ Kaliumsulfat bezogen auf den Anteil an Anhydrit

Tabelle A 5.2.3: Bewertung der Mischung 80/0/20

Probebezeichnung	80/0/20	80/0/20-1	80/0/20-2	K 80/0/20
Anmischbarkeit	+	+	+	+
Kellengängigkeit	-	+	+	+
Verarbeitbarkeit	-	+	+	+
Fugenglattstrich	-	+	+	+
Klebrigkeit Kelle	-	o	o	+
Klebrigkeit Stein	--	o	o	+
Flankenhaftung	o	+	+	+
Rissbildung	-	+	+	+
offene Zeit	45 min	45 min	45 min	45 min

Tabelle A 5.2.4: Bewertung der Mischung A80/20

Probebezeichnung	A80/20	A80/20-1	A80/20-2	K A80/20
Anmischbarkeit	+	o	-	o
Kellengängigkeit	-	+	-	o
Verarbeitbarkeit	-	+	o	+
Fugenglattstrich	-	+	o	+
Klebrigkeit Kelle	--	+	o	o
Klebrigkeit Stein	--	+	o	o
Flankenhaftung	o	+	-	-
Rissbildung	-	o	o	o
offene Zeit	30 min	30 min	30 min	30 min

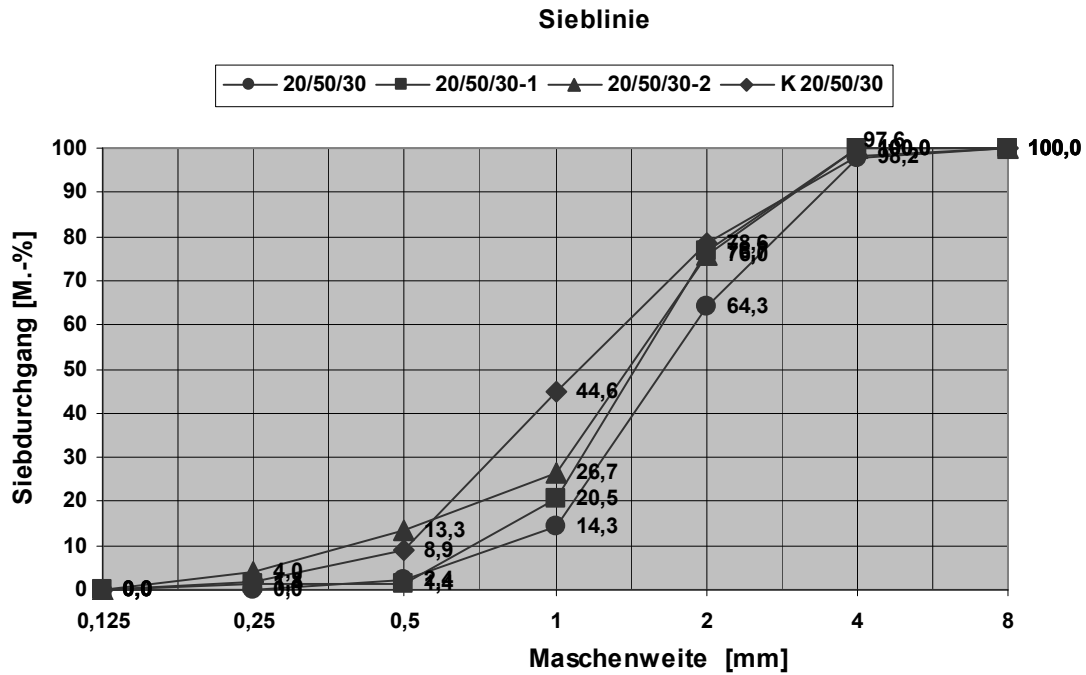


Bild A 5.2.1: Sieblinien der Mischungen (20/50/30) und K(20/50/30) sowie der Zwischenmischungen

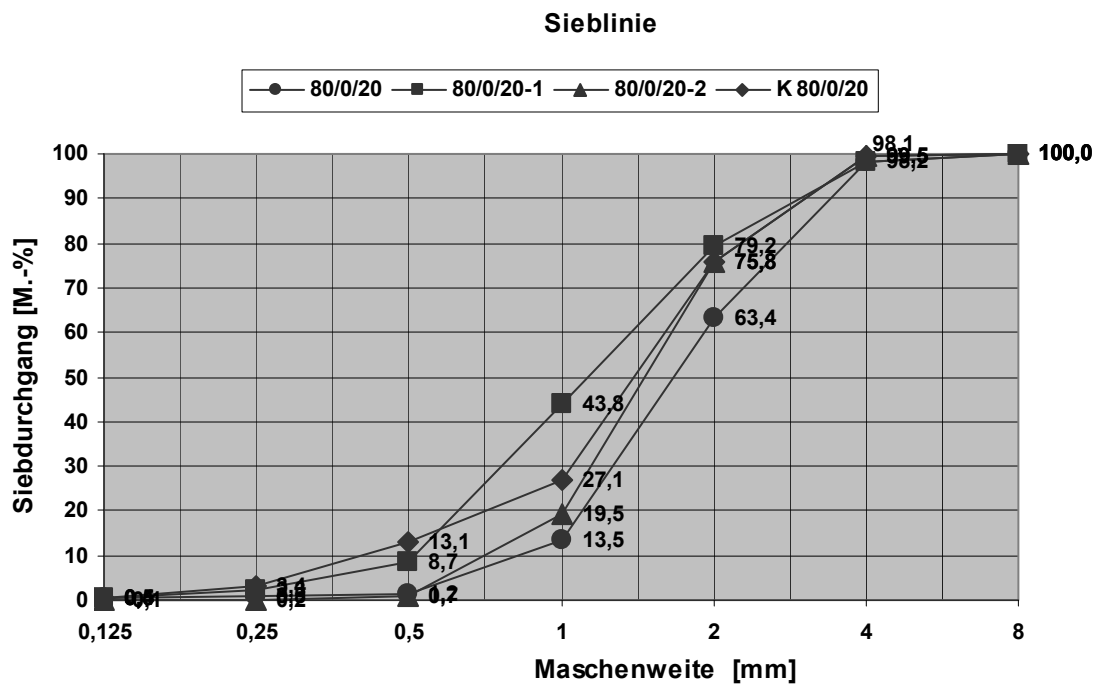


Bild A 5.2.2: Sieblinien der Mischungen (80/0/20) und K(80/0/20) sowie der Zwischenmischungen

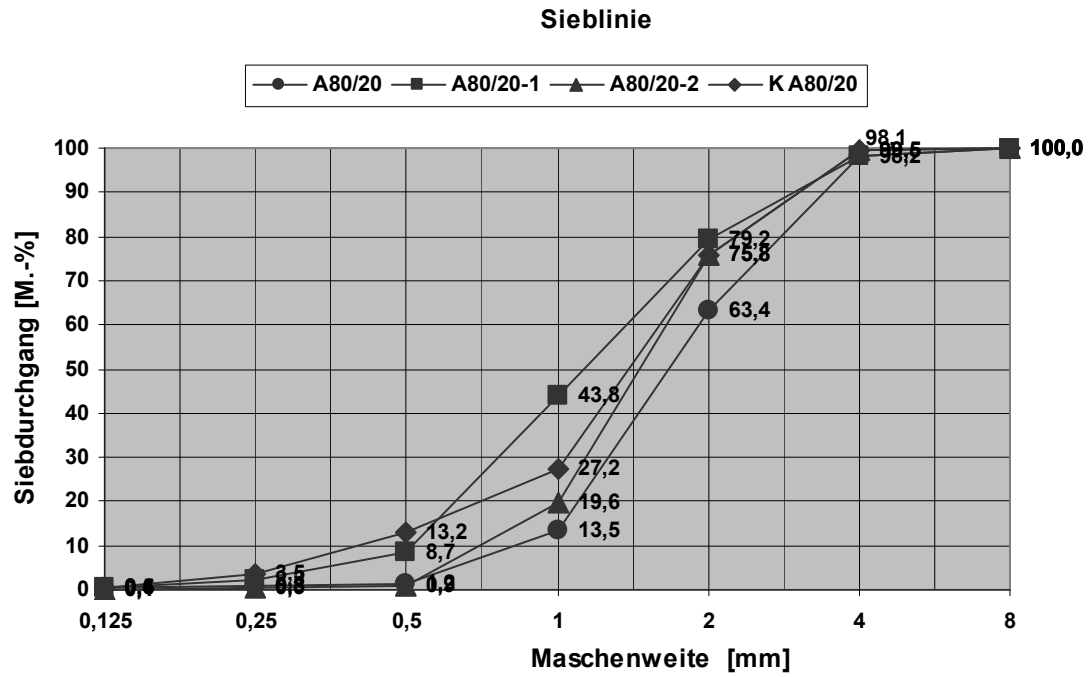


Bild A 5.2.3: Sieblinien der Mischungen A(80/20) und K A(80/20) sowie der Zwischenmischungen

Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeiten

Tabelle A 5.1: Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeit in [N/mm²]

Mischung	$\beta_{BZ\ 7}$	$\beta_{D\ 7}$	$\beta_{BZ\ 28}$	$\beta_{D\ 28}$
0/70/30	1,08	3,61	1,81	7,19
10/60/30	1,11	3,84	1,80	7,08
20/50/30	1,39	5,13	2,58	10,44
30/40/30	1,62	6,57	2,70	11,57
40/30/30	1,85	7,61	2,83	12,93
50/20/30	1,89	8,12	3,17	12,96
60/10/30	2,74	12,38	3,95	19,25
70/00/30	3,20	15,75	3,76	19,12
100/0/0/	6,85	48,56	10,51	65,42
80/00/20	3,97	24,00	5,59	24,04
A 80/20	4,22	17,05	5,43	21,61

Tabelle A 5.2: Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeit in [N/mm²]

Mischung	$\beta_{BZ\ 7}$	$\beta_D\ 7$	$\beta_{BZ\ 28}$	$\beta_D\ 28$
K 20/50/30	1,06	2,16	1,32	3,16
K 40/30/30	1,07	2,73	1,43	4,33
K 60/10/30	1,53	5,32	1,58	5,11
K 80/0/20	2,59	9,54	2,69	9,73
K A(80/20)	3,60	14,40	3,71	18,27

Tabelle A 5.3: Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeit in [N/mm²]

Mischung	$\beta_{BZ\ 7}$	$\beta_D\ 7$	$\beta_{BZ\ 28}$	$\beta_D\ 28$
K 20/50/30 MC	1,00	1,97	1,15	2,52
K 40/30/30 MC	1,03	2,26	1,25	2,89
K 60/10/30 MC	1,34	3,19	1,42	3,58
K 80/0/20 MC	2,13	6,48	2,07	6,50
K A(80/20) MC	3,27	10,86	4,27	15,31

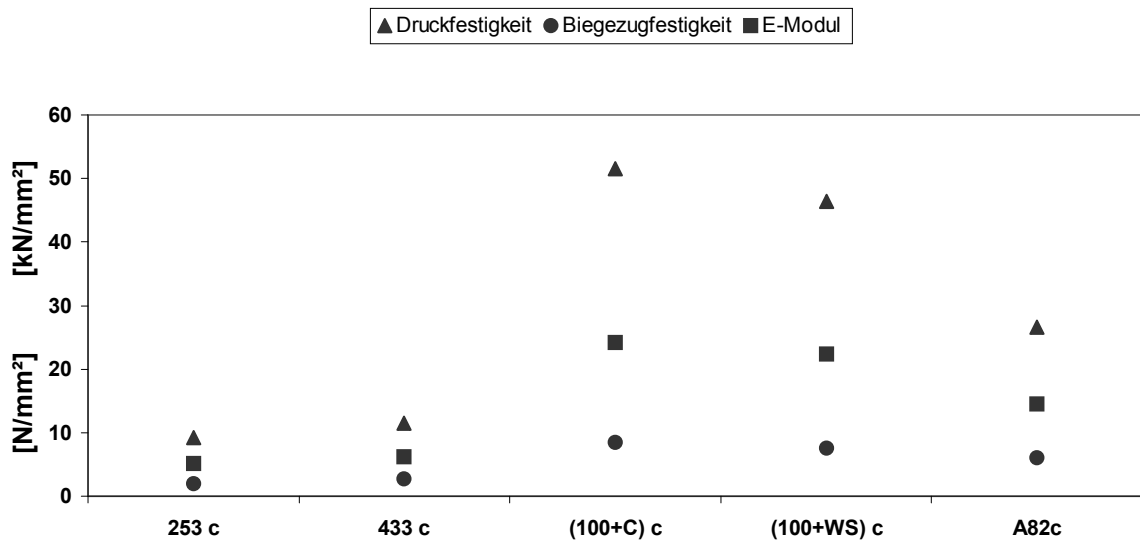


Bild A 5.1: Korrelation der 28 Tage Werte der Biegezug-, Druckfestigkeit und des dyn. E-Moduls

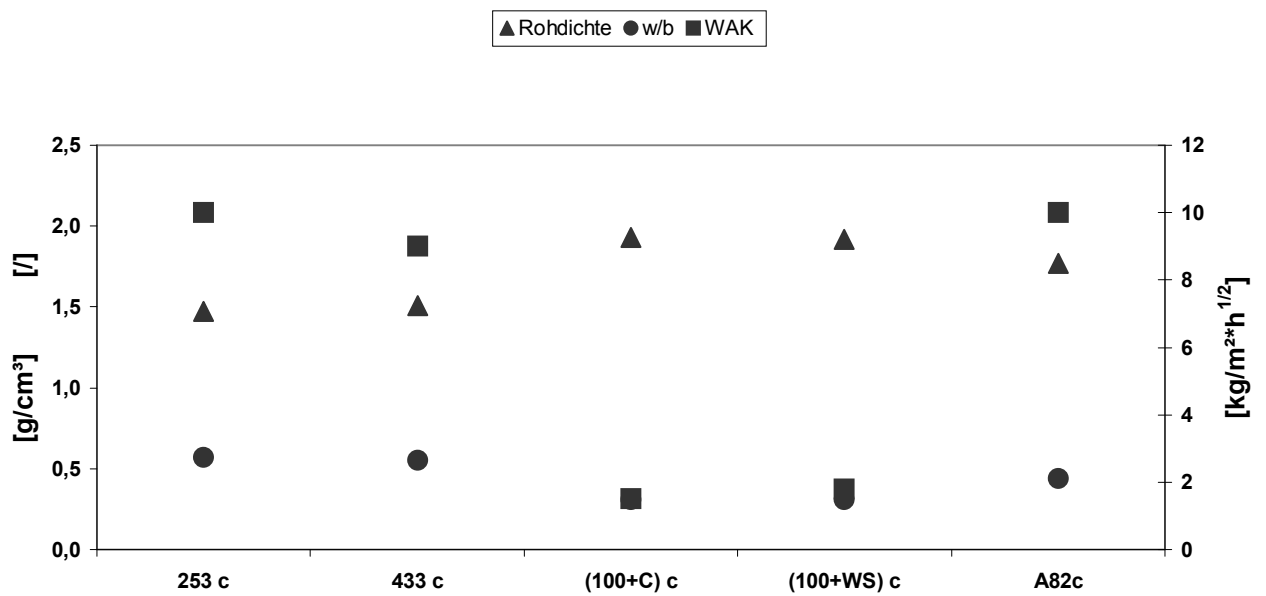


Bild A 5.2: Korrelation der Rohdichte zu w/b-Wert und WAK

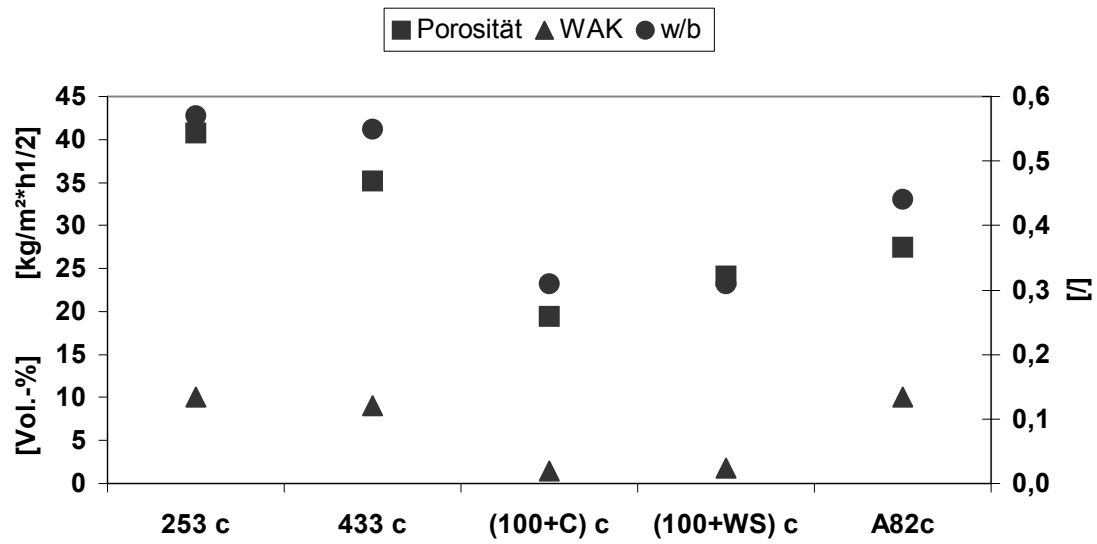


Bild A 5.3: Korrelation der Porosität zum w/b-Wert und WAK

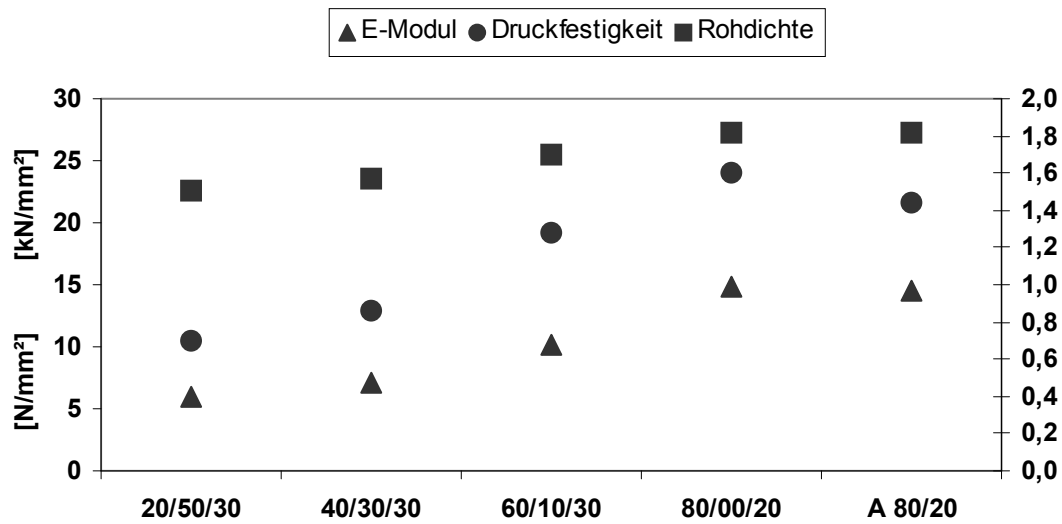


Bild A 5.4: Korrelation der Druckfestigkeit zum E-Modul und der Rohdichte

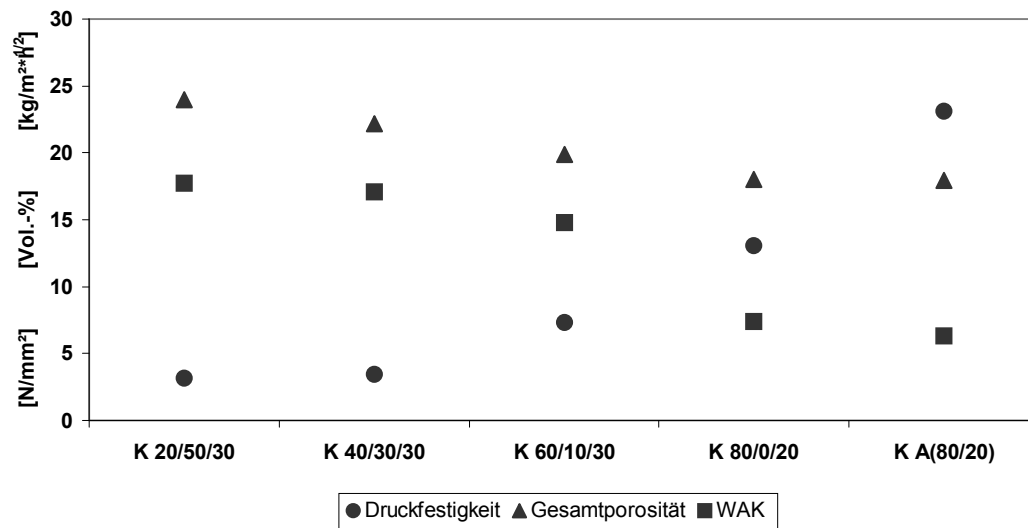


Bild A 5.7: Korrelation der Druckfestigkeit zur Gesamtporosität und WAK; Mischungen mit CL90

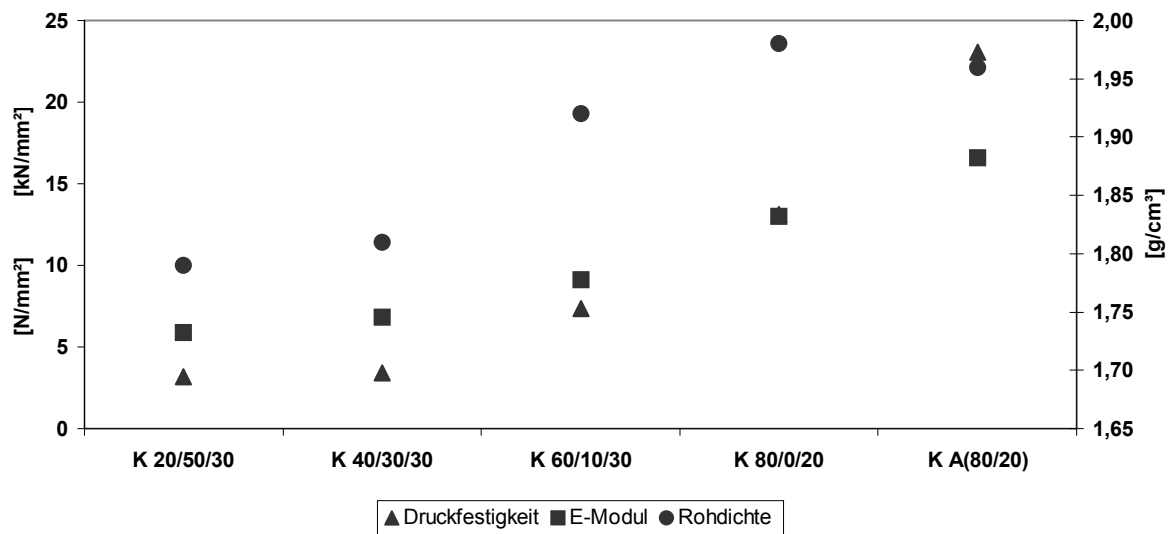


Bild A 5.8: Korrelation der Druckfestigkeit zum E-Modul und der Rohdichte; Mischungen mit CL90

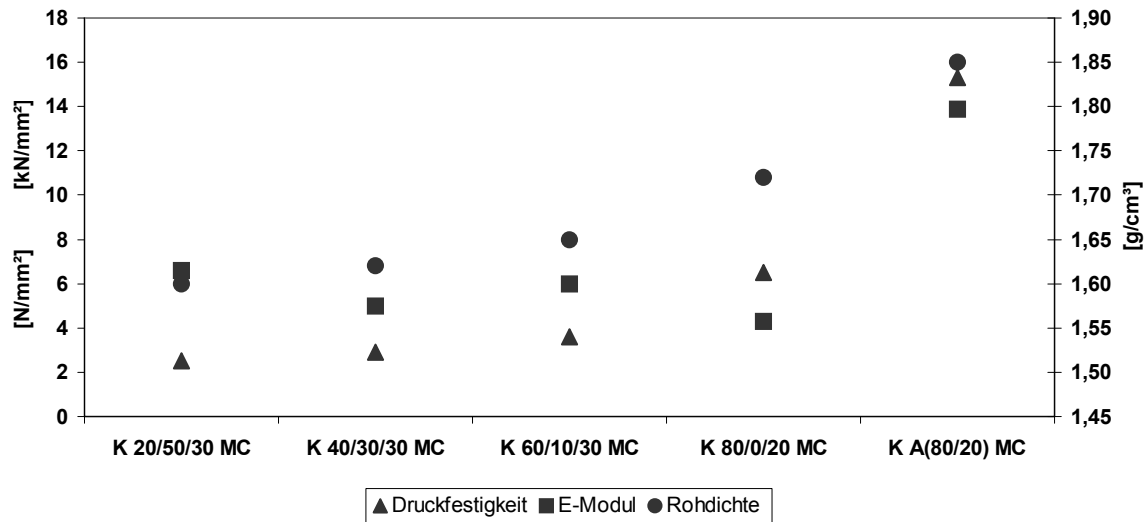


Bild A 5.9: Korrelation der Druckfestigkeit zum E-Modul und der Rohdichte; Mischungen mit CL 80

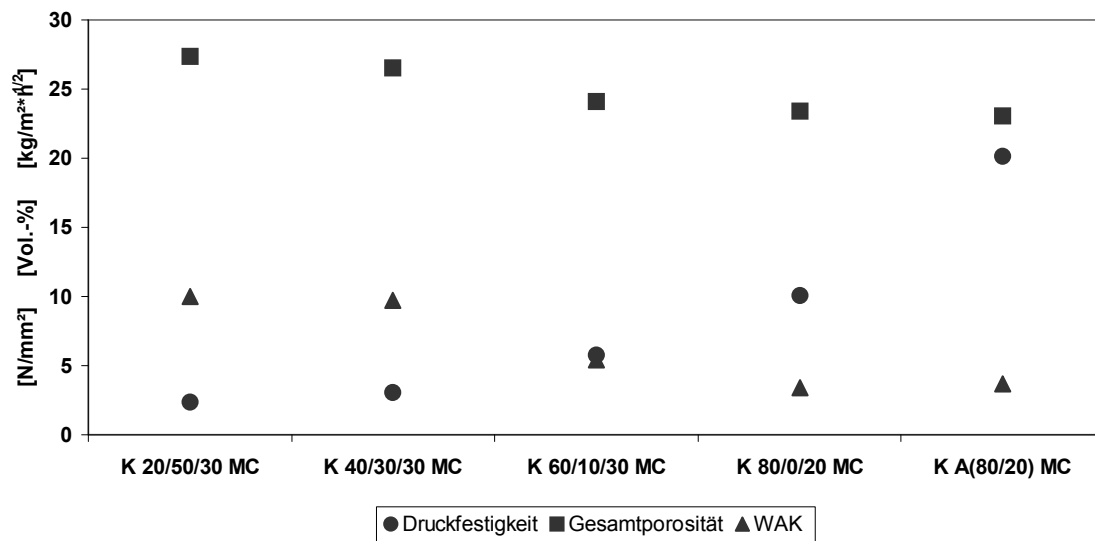


Bild A 5.10: Korrelation der Druckfestigkeit zur Gesamtporosität und WAK; Mischungen mit CL 90

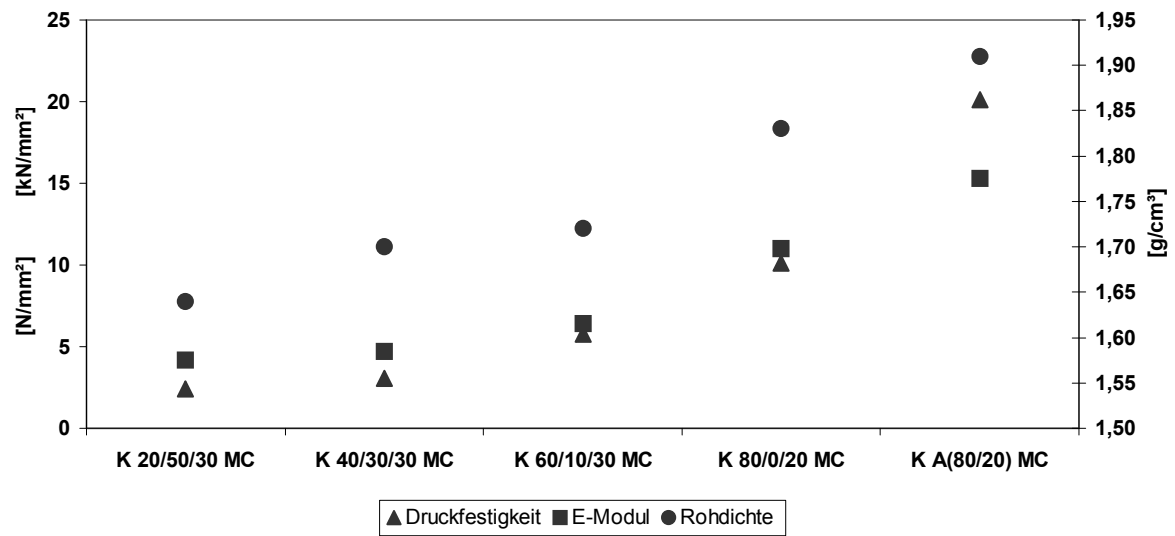


Bild A 5.11: Korrelation der Druckfestigkeit zum E-Modul und der Rohdichte; Mischungen mit CL 90

A 5.3 Frost-Tau-Wechsel Widerstand



Bild A 5.12: Probe nach 50 Frost-Tau-Wechseln



Bild A 5.13: Probe nach 50 Frost-Tau-Wechseln



Bild A 5.14: Probe nach 50 Frost-Tau-Wechseln



Bild A 5.15: Probe nach 50 Frost-Tau-Wechseln

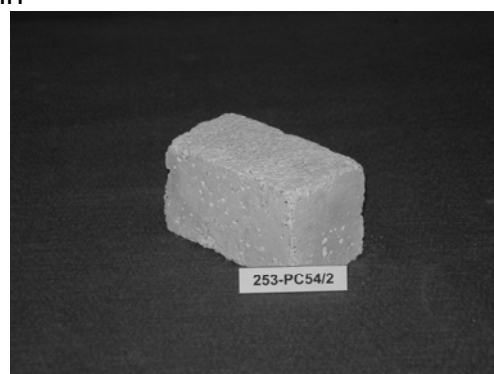


Bild A 5.16: Probe nach 50 Frost-Tau-Wechseln

A 5.4 Transportmechanismen von Feuchtigkeit im Mörtel eines Mauerwerks

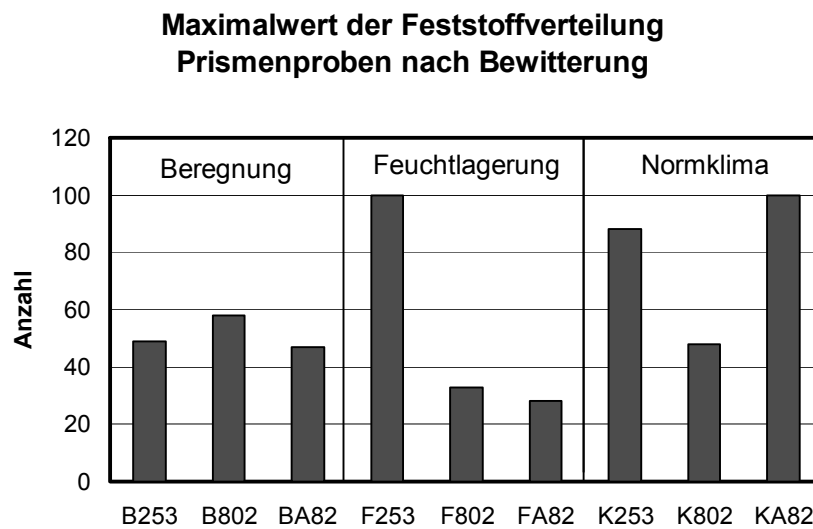


Bild A 5.17: Maximalwert der Feststoffverteilung der Prismenproben nach Bewitterung

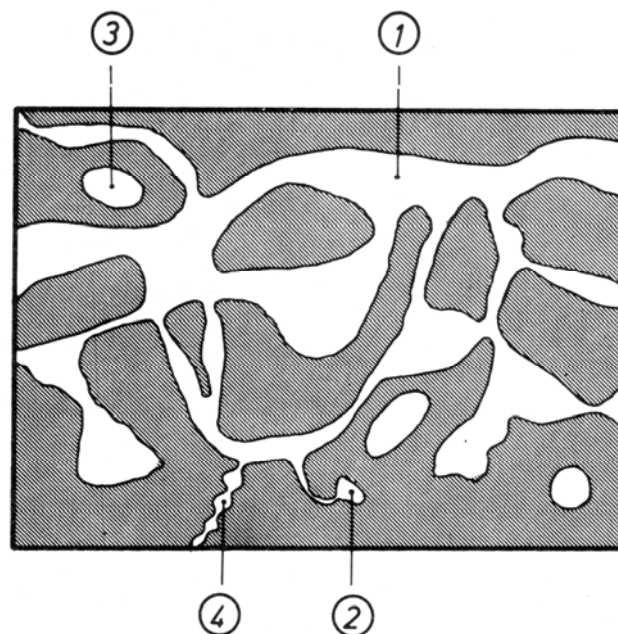


Bild A 5.18: Darstellung verschiedener Porenformen: 1: offene Pore; 2: Sackpore; 3: isolierte oder geschlossene Pore; 4: Flaschenhals oder Ink-Bottle-Pore [62]

A 5.4 Untersuchung unterschiedlich feuchtebeanspruchter Gips-Kalk-Mörtel

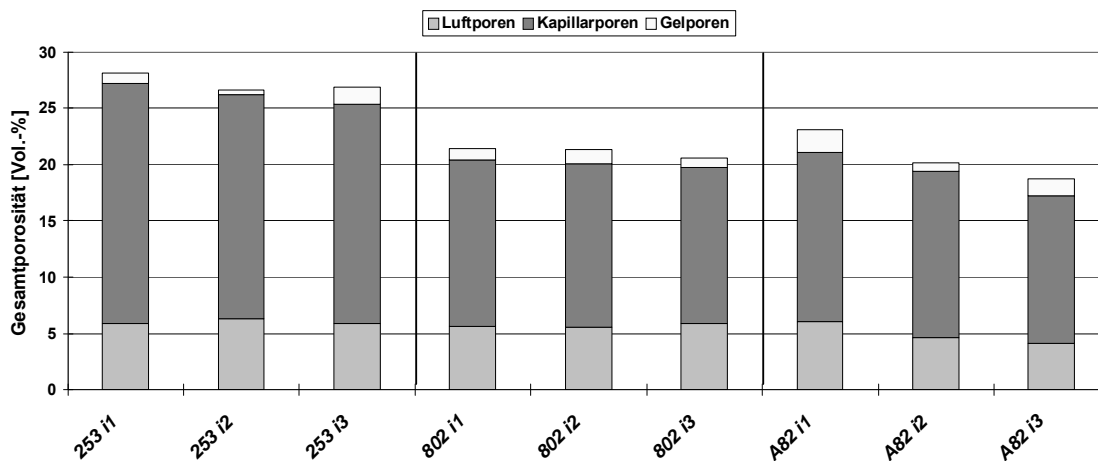


Bild A 5.19: Porenradienverteilung der Bohrkernproben; Mitte

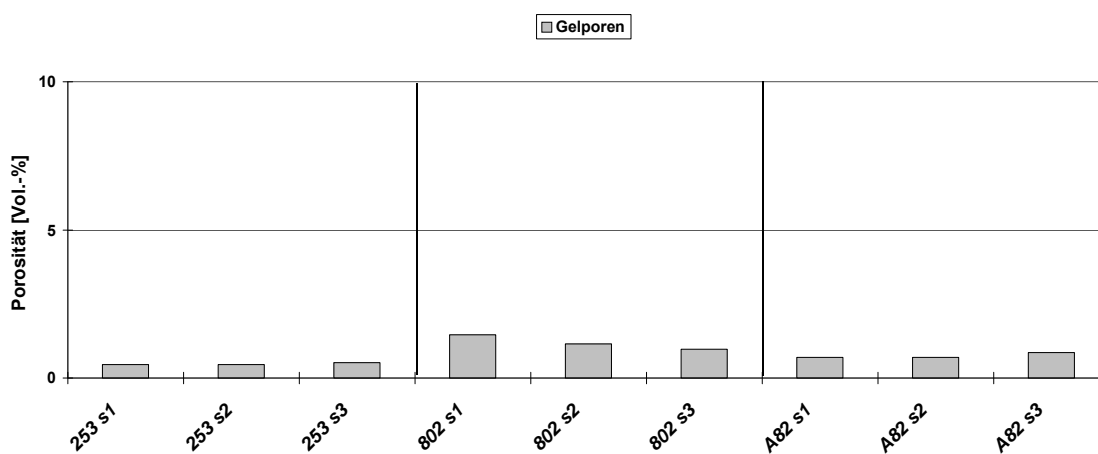


Bild A 5.20: Gelporenanteil der Bohrkernproben; Südseite

A 6 Thaumazitbildung in Gips-Kalk Mörteln

A 6.2 Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie



Bild A 6.1: REM-Aufnahme der Probe A55K; Lagerung bei 5/95

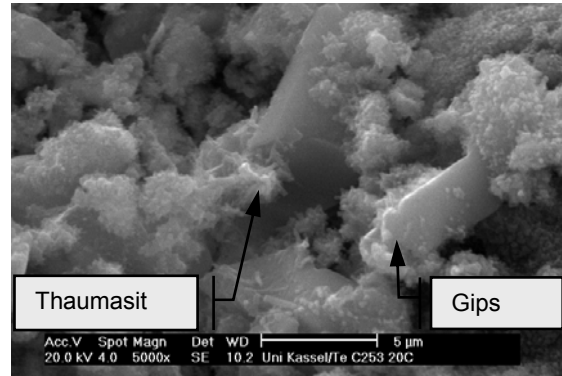


Bild A 6.2: REM- Aufnahme der Probe C253; Lagerung bei 20/65

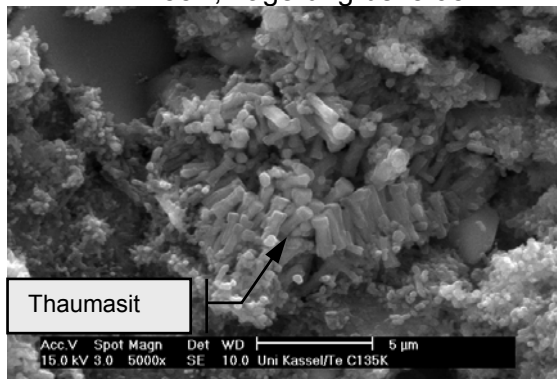


Bild A 6.3: REM-Aufnahme der Probe C135K; Lagerung bei 5/95

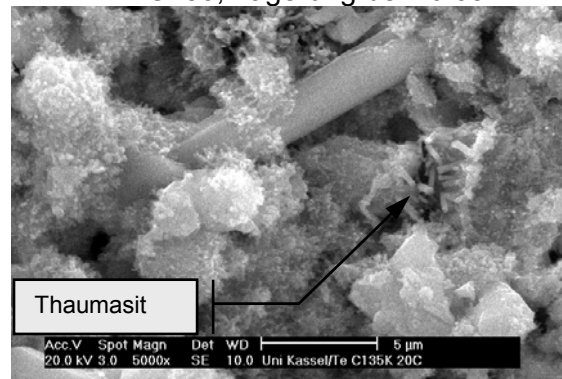


Bild A 6.4: REM- Aufnahme der Probe C135K; Lagerung bei 20/65

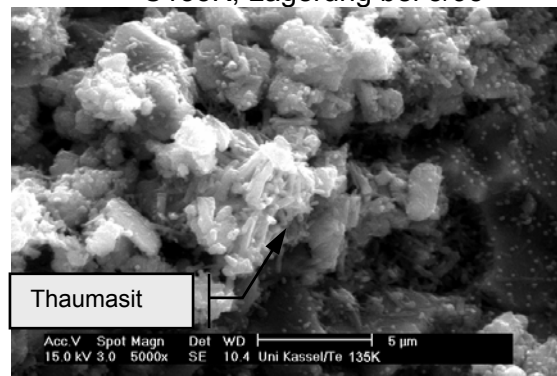


Bild A 6.5: REM-Aufnahme der Probe 135K; Lagerung bei 5/95

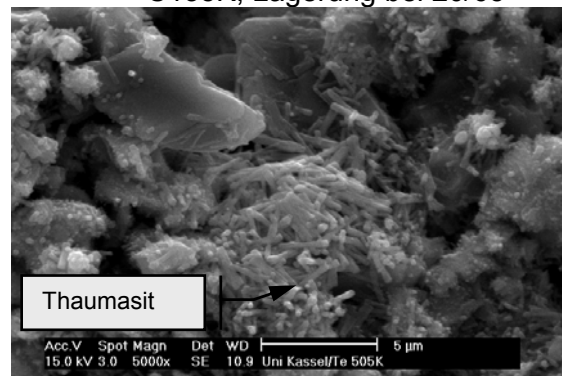


Bild A 6.6: REM- Aufnahme der Probe 505K; Lagerung bei 20/65

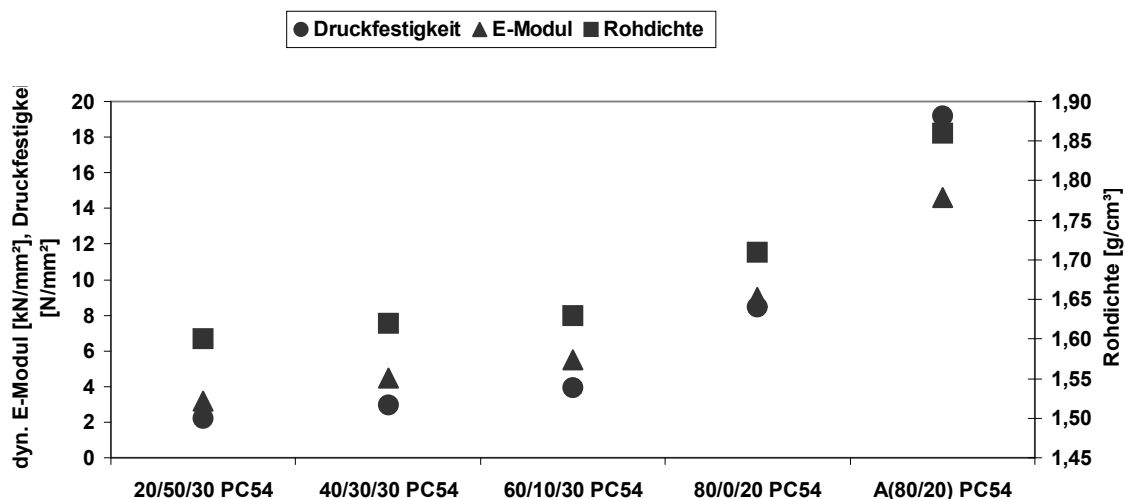


Bild A 6.8: Korrelation der Druckfestigkeit zum E-Modul und der Rohdichte; Mischungen mit PC54

Tabelle A 6.1: Biegezug- und Druckfestigkeit [N/mm²]

Mischung	$\beta_{BZ\ 7}$	$\beta_{D\ 7}$	$\beta_{BZ\ 28}$	$\beta_{D\ 28}$
K 20/50/30PC54	0,46	1,60	0,77	2,39
K 40/30/30PC54	0,64	2,21	0,94	3,08
K 60/10/30PC54	1,42	4,83	1,64	5,76
K 80/0/20PC54	1,62	5,65	2,74	10,09
K A(80/20)PC54	3,02	13,88	4,37	20,13

Tabelle A 6.2: Ergebnisse der Mischung mit PC54

Mischung	WAK	Rohdichte (7)	Rohdichte (28)	E-Modul (7)	E-Modul (28)	Gesamtporosität
	[kg/m²·h ^{1/2}]	[g/cm³]	[g/cm³]	[kN/mm²]	[kN/mm²]	[Vol.-%]
K 20/50/30PC54	10,02	1,64	1,64	3,20	4,20	27,33
K 40/30/30PC54	9,74	1,71	1,70	4,30	4,70	26,54
K 60/10/30PC54	5,45	1,72	1,72	6,00	6,40	24,10
K 80/0/20PC54	3,41	1,82	1,83	9,30	11,00	23,37
K A(80/20)PC54	3,69	1,91	1,91	13,20	15,30	23,04

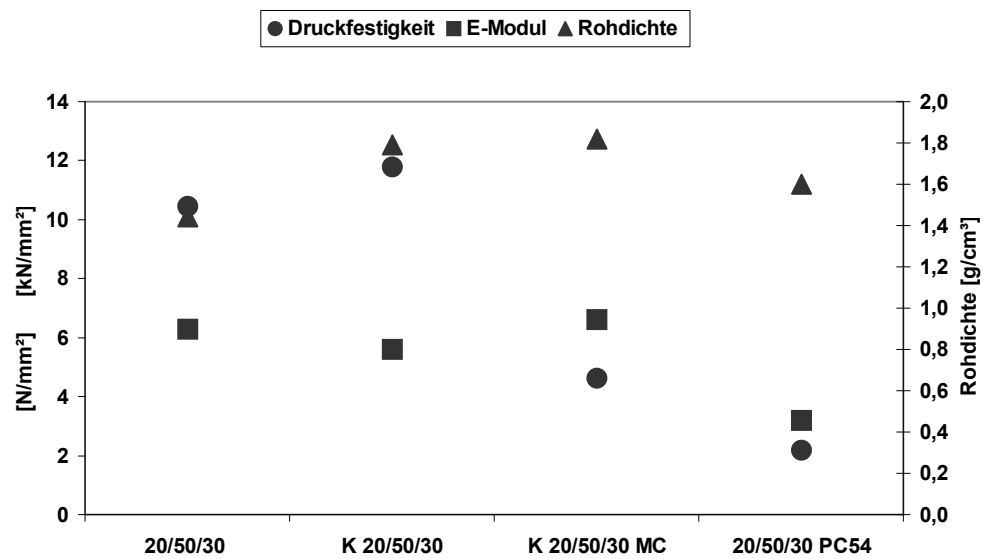


Bild A 6.9: Korrelation der Druckfestigkeit zum E-Modul und der Rohdichte; Mischung (20/50/30)