

Wolfram Jäger, Thomas Köberle, Angela Eckart
Toralf Burkert, Volker Stoll, Carola Hauschild
Beate Boekhoff

**Entwicklung einer zementfreien
Injektionstechnologie auf
Kalkbasis für historisch wertvolles,
gipshaltiges Mauerwerk
Abschlussbericht "IngiMa"**

F 3149

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0355-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Abschlussbericht „IngiMa“

„Entwicklung einer zementfreien Injektionstechnologie auf Kalkbasis für historisch wertvolles, gipshaltiges Mauerwerk“

Az.: SWD-10.08.18.7-14.29

Auftraggeber: **Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)**
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Mitfinanziert durch:**Lhoist**
Rue de l'Industrie, 31
B-1400 Nivelles Belgien

DESOI GmbH
Gewerbestr. 16
36148 Kalbach

Jäger Ingenieure GmbH
Wichernstr. 12
01445 Radebeul

Solubel
Flachsstr. 3
91207 Lauf/Neuhof

Knauf Gips GmbH
Am Bahnhof 7
97346 Iphofen

MC Bauchemie
Am Kruppwald 1-8
46238 Bottrop

Mapei
Via Cafierro 22
I-20158 Milano - Italien

Auftragnehmer: **Technische Universität Dresden**
Fakultät Architektur
Lehrstuhl Tragwerksplanung

Projektleiter: **o. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger, TU Dresden**
Lehrstuhl Tragwerksplanung

Bearbeiter: **Dipl.-Geol. Thomas Köberle, TU Dresden, Lehrstuhl**
Tragwerksplanung
Dipl.-Ing. Angela Eckart, Planungs- und Ingenieurbüro für
Bauwesen Radebeul
Dr.-Ing. Toralf Burkert, Jäger Ingenieure GmbH (Beratung)
Dipl.-Ing. Volker Stoll, Planungs- und Ingenieurbüro für
Bauwesen Radebeul
Dipl.-Ing. Carola Hauschild, Planungs- und Ingenieurbüro für
Bauwesen Radebeul
Dipl.-Ing. Beate Boekhoff, TU Dresden, Lehrstuhl
Tragwerksplanung

Datum: **31. Dezember 2018**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie aus der Industrie (s.o.) gefördert. (Aktenzeichen: Az.: SWD-10.08.18.7-14.29)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Zum Projekt	7
1.2	Problemstellung	8
1.3	Projektziele	9
1.4	Lösungsansatz, Methode	10
2	Sulfathaltiges Mauerwerk, Eigenschaften und Probleme.....	11
2.1	Schadensreaktionen.....	13
2.1.1	Ettringitbildung.....	13
2.1.2	Thaumasitbildung.....	15
3	Optimierung der Verpresstechnologie	17
3.1	Pumpfähigkeit der Suspensionen.....	17
3.2	Überprüfung der Schwind- und Sedimentationsneigung	18
3.3	Beobachtung des Verpressvorganges.....	20
3.4	Prüfung der Fließfähigkeit von Suspensionen	21
3.5	Optimierung Schaumtechnologie	24
4	Prüfung der Sulfatbeständigkeit von Materialien auf unterschiedlicher Bindemittelbasis	28
4.1	Tests zur Prüfung der Sulfatbeständigkeit.....	28
4.2	Prüfung der Sulfatbeständigkeit verschiedener handelsüblicher Materialien	32
4.2.1	Material.....	32
4.2.2	Durchführung.....	35
4.3	Ergebnisse der Sulfatbeständigkeitsprüfung	36
4.3.1	Romanzemente	36
4.3.2	Vorwiegend kalkgebundene Fertigmörtel.....	39
4.3.3	Vorwiegend latent-hydraulisch gebundene Mörtel	40
4.3.4	Puzzolanisch gebundene Mörtel	42
4.4	Zusammenfassung der Sulfatbeständigkeitstests.....	43
5	Erstellung eines geeigneten Verpressmaterials	46
5.1	Möglichkeiten zur Erstellung eines sulfatbeständigen Materials	46
5.1.1	Bindemittel auf der Basis von Kalk.....	46
5.1.2	Latent hydraulische beziehungsweise puzzolanische Bindemittel.....	47
5.1.3	Bindemittel auf Caliumsulfatbasis (Gips, Halbhydrat, Anhydrit)	49
5.2	Erstellung eines neuen Materials auf Calciumsulfatbasis.....	50
5.2.1	Prüfbedingungen	50
5.2.2	Verfügbare Bindemittel im Calciumsulfatsystem	51
5.2.3	Eingesetzte Materialien und Mischregime	53
5.2.4	Technologische Ziele für einen Injektionsmörtel	54
5.2.5	Arbeiten mit CASEA-Hochbrandgips	55
5.2.6	Geeignete Materialkombinationen für einen Injektionsmörtel	60

5.3	Erstellung eines neuen geschäumten Materials auf Calciumsulfatbasis.....	72
5.3.1	Schäumbarkeit	72
5.3.2	Versuche mit Aluminiumpulver	72
5.3.3	Versuche mit konventionellen Schaumbildnern.....	74
5.3.4	Einsatz von CASEA-Hochbrandgips für einen Injektionsschaummörtel	76
5.3.5	Schaummörtel	78
6	Simulation des Mauerwerksversagens	81
6.1	Eingangsdaten	81
6.1.1	Grundannahmen	81
6.1.2	Geometrie.....	81
6.1.3	Materialdaten.....	82
6.1.4	Lasten.....	83
6.2	Ergebnisse der Simulation	84
6.2.1	Elastisches System (Kleinmodell).....	84
6.2.2	Mörtel 2 trocken	86
6.2.3	Wandausschnitt	89
6.2.4	Mauerwerksdruckfestigkeit	91
6.3	Einordnung der Simulation	92
7	Modellobjekte	93
7.1	Modellmauer auf dem Versuchsgelände der TU Dresden	93
7.2	Schloss Steinort.....	93
8	Zusammenfassung	101
8.1	Technologien zum Verpressen von historischem Mauerwerk	101
8.1.1	Verfüllen von Hohlräumen.....	101
8.1.2	Herstellen des Kraftschlusses.....	102
8.1.3	Vernadeln und Verankern	102
8.1.4	Vorbereitung des Mauerwerks.....	102
8.1.5	Verpresstechnik und Verpressvorgang.....	102
8.2	Injektionsmaterial.....	103
8.2.1	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Mörteln und Simulation von Schädigungen	104
8.2.2	Prüfung von Fertigmörteln auf unterschiedlicher Bindemittelbasis	104
8.2.3	Bindemittelmischungen auf der Basis von Puzzolan	104
8.2.4	Injektionsmaterial auf Calciumsulfatbasis mit Kalkanteil.....	104
8.2.5	Injektionsschaummörtel.....	105
9	Instandsetzung von historisch wertvollem, gipshaltigen Mauerwerk durch Injektionen - Aussagen und Hinweise für die Praxis	106
9.1	Notwendigkeit und Ziel	106
9.1.1	Verfüllen/ Verpressen von Hohlräumen.....	107
9.1.2	Herstellen des Kraftschlusses.....	109
9.1.3	Verankern und Herstellen des Verbundes	109

9.2	Vorbereitung, Planung und Vergabe	110
9.2.1	Bestands- und Schadensaufnahme / Beurteilung des Mauerwerks	110
9.2.2	Planung	111
9.2.3	Vorbereitung der Vergabe und Vergabe	115
9.3	Vorbereiten, Verfugen und Setzen von Packern	116
9.4	Bohren	116
9.5	Technik zum Verpressen	116
9.6	Injektionsgut	117
9.7	Durchführung	118
9.8	Qualitätskontrolle und Injektionserfolg	120
9.9	Überwachung und Abrechnung	120
9.10	Dokumentation und Langzeitkontrolle von gipshaltigen Mauerwerksbauten	121
10	Ausblick	123
11	Literatur	124

Abkürzungen und Begriffe

C	Centrilit (Metakaolin)
CH	Tradical (Calciumhydroxid)
DH, Dihydrat	Calciumsulfathalbydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
GM	Gipsmörtel
HH, Halbydrat	Calciumsulfathalbydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$
HT-Rohr	Hochtemperaturrohr, Rohre aus Polypropylen (PP), bis 95 °C wärmebeständig, resistent gegen Salze, Laugen und Säuren
MW	Mauerwerk
P	Puzzolan
sulfathaltiges Mauerwerk	Mauerwerk mit sulfatischen Bestandteilen, exakte Definition in Kap. 2
W/Bm	Wasser-Bindemittel-Wert
W/F	Wasser-Feststoff-Wert

Lagerungsbedingungen

Normklima	20°C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit (gelbe Färbung)
Lagerung über Wasser	20°C und ca. 98 %-100 % relative Luftfeuchtigkeit (blaue Färbung)
Trocknung nach Norm	35°C im Trockenschrank mit Umluft bis zur Massekonstanz (grüne Färbung)

Farben

helle Farben	Biegezugfestigkeiten
dunkle Farben	Druckfestigkeiten

verwendete Abkürzungen der in der Zementchemie üblichen oxidischen Schreibweise

C	für CaO
A	für Al_2O_3
F	für Fe_2O_3 und
H	für H_2O .
S	für SiO_2
C_3A	Calciumaluminat, Portlandzementklinkerphase
$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$	Mischkristallreihe Calciumaluminatferrit, Portlandzement-Klinkerphase

1 Einleitung

1.1 Zum Projekt

Der Gips gilt als das älteste künstlich hergestellte Bindemittel, welches Menschen für Sakral- und Profanbauten verwendeten und heute noch für viele Bauaufgaben nutzen. Es kann nur spekuliert werden, wie der Mensch die wertvollen Eigenschaften des Gipses entdeckte. Wahrscheinlich haben Gesteinsbrocken aus Gips zur Begrenzung eines Feuers gedient, sind durch die Hitze mürbe geworden und zu Pulver zerfallen. Bei Kontakt mit Wasser entstand dann eine formbare mörtelähnliche Masse, die an der Luft erhärtete. Gips kam bereits Jahrtausende vor unserer Zeitrechnung zum Einsatz. Je nach regionaler Verfügbarkeit wurde beziehungsweise wird heute noch Rohgips abgebaut, unter sehr unterschiedlichen Bedingungen gebrannt, zerkleinert und als Baustoff verwendet. Mit Verbreitung des Portlandzementes Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Gipsverwendung zurückgedrängt und hydraulische Baustoffe traten ihren Siegeszug an. Die Merkmale des Gipses traten in den Hintergrund und viel Wissen um diesen wertvollen Baustoff geriet in Vergessenheit. Insbesondere mangelnde Bauwerkspflege oder ungünstige Sanierungen führten an gipshaltigen Mauerwerksbauten zu gravierenden Schäden - teilweise bis zum Verlust der Standsicherheit. Risse in den Mauern, ein Verlust der kraftschlüssigen Verbindung von äußerer und innerer Mauerschale und Ausspülungen durch eindringenden Niederschlag bis in die Fundamentbereiche begünstigen den Verfall der Objekte. Derartigen Schadensphänomenen wird in heutiger Zeit meist durch Mauerwerksinjektionen und Verankerungen begegnet, um das Tragverhalten des Mauerwerks wieder herzustellen. Etablierte Verpressmörtel basieren in der Regel auf zementgebundenen Systemen. Deren hydraulische Bestandteile können im Kontakt zum sulfathaltigen Mauerwerk zu starken Treiberscheinungen (Ettringitbildung) und zur Mörtelzerstörung (Thaumasitbildung) führen. Dies führt oft zu irreparablen Schäden in deren Folge ein Mauerwerksabbruch steht.



Bild 1 *Rückbau der Stadtmauer Mühlhausen im Bereich Frauentor 2018*

Die Forschungsprojekte des Lehrstuhls für Tragwerksplanung an der TU Dresden im Nahen Orient, wie beispielsweise am Weltkulturerbe Takht-e Soleyman im Iran, dem Bibi Kahnum in Samarkand/Usbekistan und Chor Minor in Buchara/Usbekistan waren die Grundlagen für die Beantragung dieses Projektes.

Viele Objekte mit sulfathaltigem Mauerwerk in Deutschland benötigen eine ähnliche Lösung für die Wiederherstellung der Standsicherheit. Sie bedürfen einer Sicherung durch Vernadeln und/oder Verankern mit einem sulfatverträglichen Injektionsmörtel und der dafür angepassten Injektionstechnologie. Heute gilt es, moderne Technologien mit historischer Handwerkskunst zu verknüpfen, um den Erhalt historisch wertvoller Bausubstanz zu ermöglichen.

Der Projektname „IngiMa“ transportiert verkürzt den Projekttitel „Entwicklung einer zementfreien Injektionstechnologie auf Kalkbasis für historisch wertvolles, gipshaltiges Mauerwerk“. Das Projekt wurde durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ gefördert. Mitfinanziert und fachlich unterstützt wurde das Projekt durch Lhoist, die DESOI GmbH, die Jäger Ingenieure GmbH, Solubel, die Knauf Gips GmbH, MC Bauchemie und Mapei.

In dem Projekt wurden Lösungen erarbeitet, wie mit innovativer Injektionstechnik und geeigneten Materialien die Tragsicherheit von sulfathaltigem Mauerwerk wiederhergestellt werden kann. Dies soll dazu beitragen, historisch wertvolle Bausubstanz weltweit zu erhalten und für den Publikumsverkehr ohne Gefahrenpotential zugänglich zu machen. Nicht im Fokus des Projektes lag die Sanierung bereits treibmineralgeschädigter Objekte.

1.2 Problemstellung

Historische Gipsmauerwerke sind besonders sensible Systeme und anfällig auf sich ändernde Umwelteinflüsse. Das liegt vor allem an den besonderen Eigenschaften des Baustoffs Gips. Zum einen ist Gips im Vergleich zu anderen Baustoffen – außer Lehm, hier sind die Verhältnisse noch gravierender - sehr gut in Wasser löslich. Bei 20°C lösen sich 2,1 g Gips in einem Liter Wasser.

Bereits bei einer geringen Zunahme der Materialfeuchtigkeit verringert sich die Druckfestigkeit von Gips signifikant [1]. Aufgrund dessen besteht bei historischen Gebäuden, die aus Gipsmörtel und/ oder Gipsstein gebaut sind, eine besondere Notwendigkeit diese vor eindringenden Wässern zu schützen. Ansonsten können sich zunächst kleinere Schäden, wie etwa durch Erdbeben oder statische Setzungen entstandene Risse, in kurzer Zeit potenzieren. Diese Besonderheit des Baustoffs Gips ist auch bei Reparaturen durch Injektionen zu beachten. Die eben erwähnten Schäden werden in heutiger Zeit normalerweise durch Injektionen mit Verpressmörtel behoben. Im Regelfall geht die Injektion mit Verpressgut jedoch mit einem großen Wassereintrag in das Mauerwerk einher. Damit die Fließfähigkeit des Injektionsgutes gewährleistet ist, wird der Mörtel zunächst sehr feucht eingestellt. Dies kann bei Objekten, die aus sulfatischen Materialien errichtet wurden, jedoch zu großen Schäden führen [18].

Innerhalb der mineralischen Bindemittel scheiden diejenigen aus, die zur Erhärtung CO_2 aus der Luft benötigen, da dieses nicht in die Tiefe des Mauerwerks transportiert werden kann und eine Erhärtung zu CaCO_3 dadurch nicht möglich ist. Reine Luftkalkmörtel sind deshalb nicht geeignet.

Deshalb werden im Normalfall Mauerwerksinjektionen mit zementären Bindemitteln ausgeführt. Eine gute Zusammenstellung von Techniken und Material gibt Kratzsch in [12]. Wird jedoch Portlandzement in gipsführendes Mauerwerk eingebracht, dann bilden sich, in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit, mehr oder minder schnell schädigende Minerale.

Besonders die Bildung von Ettringit und Thaumasit ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung [9], [19].

1.3 Projektziele

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung einer innovativen Verpresstechnologie, die einerseits den besonderen Bedingungen der Mauerwerksinjektion in historische Bauwerke Rechnung trägt und andererseits die Schwierigkeiten der Materialunverträglichkeit mit dem sensiblen Baustoff Gips umgeht.

Durch Risse und Hohlstellen geschädigtes historisches Mauerwerk ist oftmals äußerst empfindlich gegen mechanische Beanspruchung. Dies ist vor allem beim Verschließen der Risse und beim folgenden Verpressen zu beachten. Die Injektionen können nur bei geringem Druck und mit geeigneten Packern durchgeführt werden. Weiterhin sollte in dem Forschungsprojekt ein geeignetes Verpressgut entwickelt werden, welches mit dem umgebenden Gipsmauerwerk kompatibel ist und einem inneren Sulfatangriff widerstehen kann. Der Verpressmörtel sollte zudem als Schaummörtel modifizierbar sein. Neben der Reduktion des eingebrachten Gewichts, was zu einer Verringerung der zusätzlichen Belastung führt, haben Schaummörtel im Gesamtvolumen einen geringeren Wassergehalt. Der Eintrag von Feuchte in das Mauerwerk, welcher ebenfalls als negative Eigenschaft der Verpresstechnologie gesehen wird, sollte so umgangen werden. Durch den Eintrag der Poren wird der Kapillarttransport unterbrochen und Platz geschaffen für sich eventuell bildende Salze. Diese könnten ohne den Aufbau von destruktiven Drücken im Schaummörtel kristallisieren. Für die Prüfung und anschließende Bewertung der Materialien war zunächst die Erarbeitung von geeigneten Prüfmethoden notwendig. Die Projektergebnisse wurden gemeinsam mit den Projektpartnern diskutiert und über Veröffentlichungen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Injektionstechnologien wurden an einem Modellobjekt und an einer Modellmauer erprobt.



Bild 2 Ziele im Projekt

1.4 Lösungsansatz, Methode

Die Arbeiten innerhalb des Projektes gliedern sich in vier Arbeitsbereiche (Projektsäulen, s Bild 3).

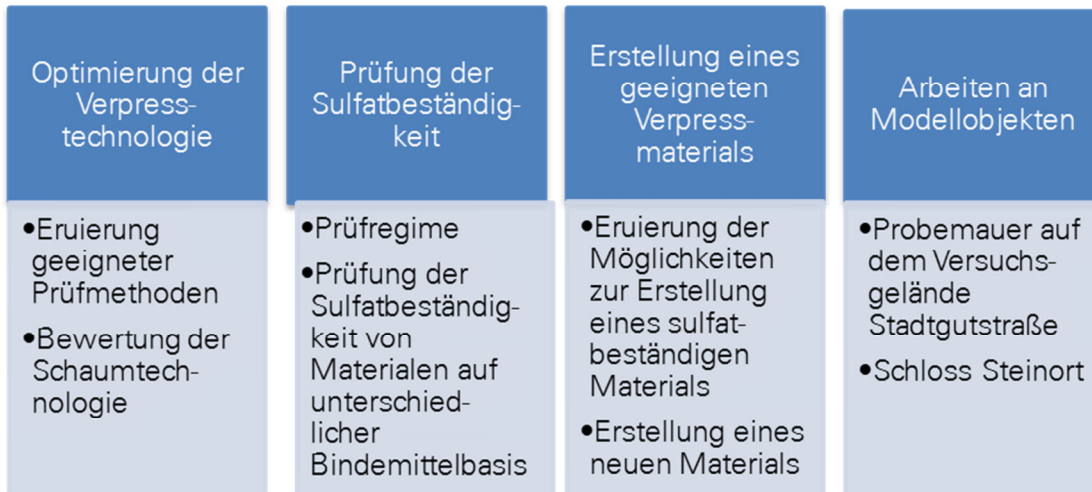


Bild 3 Projektsäulen

Die einzelnen Arbeitsbereiche wurden teilweise parallel bearbeitet. Änderungen durch Forschungsergebnisse beeinflussten die Arbeitsbereiche maßgeblich.

So wurden bei der Suche nach einem geeigneten Verpressmaterial zunächst Fertigprodukte untersucht, diese modifiziert und erneut in Bezug auf ihren Sulfatwiderstand untersucht. Auf Grund der Ergebnisse wurde dieses Vorgehen als nicht zielführend verworfen. Eine Aktivierung puzzolanischer Materialien ohne Portlandzementzusatz konnte in technisch relevanten Zeiträumen nicht realisiert werden. Infolgedessen wurde für das Verpressmaterial ein Bindemittel auf Calciumsulfatbasis favorisiert. Dieses wurde mit einem kalkhaltigen Füller optimiert. Für Anwendungen mit geringen Festigkeitsanforderungen wurde das Verpressmaterial geschäumt.

2 Sulfathaltiges Mauerwerk, Eigenschaften und Probleme

Während einer Sanierung verdienen Bauwerke, die in sulfathaltigen Böden errichtet wurden (Gips- und Anhydritgestein, aber auch pyrithaltiges Gestein) und historische Gebäude, die aus Kalk-, Sand-, Gipsgesteinen mit Gipsmörtel beziehungsweise gipshaltigen Mörtel errichtet wurden, besondere Beachtung [1], [23]-[25].

In [1] sind die verschiedenen Mauerwerkstypen für sulfathaltiges Mauerwerk definiert:

*„**Gipsmauerwerk** ist Mauerwerk, das überwiegend Gips- oder Anhydritsteine sowie überwiegend Gipsmörtel enthält.*

***Gipssteinmauerwerk** ist Mauerwerk, das überwiegend Gips- oder Anhydritsteine enthält, der Mörtel jedoch kein Gips oder Anhydrit aufweist.*

***Mauerwerk mit Gipsmörtel** ist Mauerwerk, welches nur untergeordnet Gips- oder Anhydritsteine enthält, als Mauermörtel aber überwiegend Gipsmörtel eingesetzt wurde.*

***Mauerwerk mit gipshaltigem Mörtel** ist Mauerwerk, welches nur untergeordnet Gips oder Anhydritsteine enthält, als Mauermörtel aber überwiegend ein gipshaltiger Mörtel eingesetzt wurde.*

***Füllmauerwerk mit Gips** ist mehrschaliges Mauerwerk, bei dem die Hinterfüllung überwiegend aus Gips- oder Anhydritsteinen und / oder Gipsmörtel besteht.*

***Gipshaltiges Füllmauerwerk** ist mehrschaliges Mauerwerk, bei dem die Hinterfüllung nur untergeordnet aus Gips- oder Anhydritsteinen und / oder Gipsmörtel besteht.*

***Gipsbelastetes Mauerwerk** ist Mauerwerk, das in den Ausgangsstoffen keinen Gips enthält, sondern bei dem sich Gips infolge von nachträglichen Stoffeinträgen gebildet hat.“*

Eine Besonderheit des Gipsmörtels ist der Festigkeitsverlust infolge Wasserzufuhr. Die Festigkeit sulfatischer Mörtel kann bis unter 40 % der Ausgangsfestigkeit sinken (Bild 4), so dass allein dieser Einflussfaktor ganz entscheidend auf die weiteren Vorgänge im Mauerwerk wirkt.

Dieser Besonderheit wurde im Laufe der Projektbearbeitung große Aufmerksamkeit geschenkt.

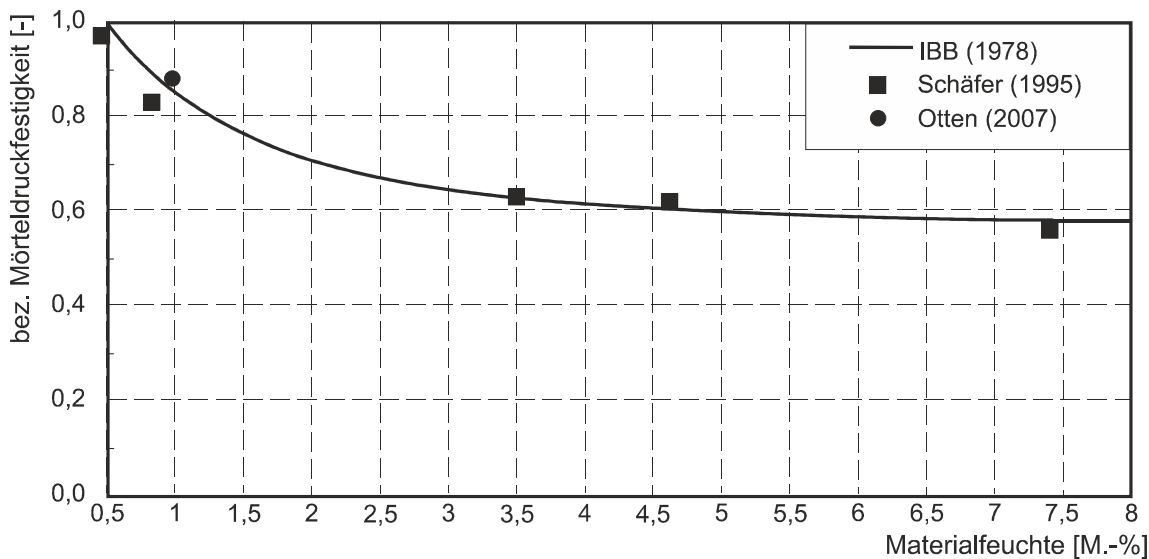


Bild 4 *Druckfestigkeit von Gipsmörteln bei unterschiedlicher Materialfeuchte, bezogen auf die Druckfestigkeit bei einer Ausgleichsfeuchte von 0,5 M.-% bei ca. 60% rel. Luftfeuchte, aus [1]*

Twelmeier geht in [26], [27] intensiv auf die Verformungseigenschaften und die damit verbundenen Dauerhaftigkeitsprobleme des Gipsmörtels ein. Gipsmörtel weisen ein ausgeprägtes Kriechverhalten auf. Infolgedessen werden im Mauerwerk auftretende Spannungen gut abgebaut. Im Vergleich zu Mörteln aus anderen Bindemitteln bildet Gipsmörtel eine geringere Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Stein aus. Auf Grund des ausgeprägten viskoelastischen Verhaltens von Gipsmörtel zeigt sich trotzdem eine geringere Rissanfälligkeit im Vergleich zu anderen Materialien [28].

Historische sulfathaltige Mörtel im Mauerwerk zeigen ausgeprägte Selbstheilungskräfte. Lösungs- und Rekristallisationsprozesse durch zeitweisen Wassereintrag bewirken das Schließen von Mikrorissen.

Bei der Instandsetzung von derartigem Mauerwerk wurde und wird der hohe Sulfatanteil häufig völlig ignoriert oder zumindest seine Auswirkung im Grenzflächenbereich zu anderen Bindemitteln stark unterschätzt. So kamen häufig ungeeignete Injektionsmörtel zur Anwendung. Diese führten im Mauerwerk nach wenigen Jahren zu erneuten Schäden durch Treib- und Entfestigungsreaktionen an den instand gesetzten Gebäuden. Derartige Schäden sind oft so extrem, dass ein Abriss bzw. Teilabriss der Gebäude nicht zu umgehen ist. Beispiele hierfür sind das Schloss Wiehe und der Kirchturm von Eilenstedt. Die wirtschaftlichen, ideellen und kunsthistorischen Schäden sind infolge dessen sehr hoch.



Bild 5 *Zerstörtes Mauerwerksgefüge des Kirchturms der Kirche in Eilenstedt*

Grundlagenarbeiten beziehen sich meist auf die Treibmineralbildung im Beton. Im inhomogenen historischen Mauerwerk, oft Bruchsteinmauerwerk, laufen die Prozesse unter deutlich anderen Bedingungen ab. Im sulfathaltigen Mauerwerk bzw. reinem Gipsmauerwerk sind immer ausreichend Sulfationen für eine Schadreaktion mit potentiellen Partnern vorhanden. Diese Gefahr ist schon sehr lange bekannt [28]-[31], wurde aber viele Jahre unterbewertet. Carbonationen für eine Thaumasitbildung können z.B. durch ungeeignetes Injektionsmaterial ins Mauerwerk gelangen. Beispiele hierfür sind Fertigmörtel mit einem Anteil Kalksteinmehl (Zumahlstoff, Füller). Aber auch bei einigen CEM II-Arten kann ein hoher Anteil Kalksteinmehl enthalten sein. Ferner können alle Normzemente bis zu 5 M.-% Nebenbestandteile enthalten, unter denen sich meist Kalksteinmehl befindet. Im historischen Mauerwerk oft auftretende Temperaturen unter 10°C begünstigen die Reaktion deutlich [32], [33]. Voraussetzung ist ausreichende Feuchtigkeit im Mauerwerk.

2.1 Schadensreaktionen

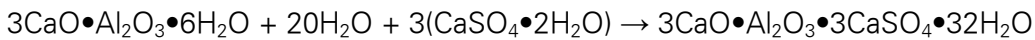
Die theoretischen Grundlagen zur Ettringit- und Thaumasitbildung sind inzwischen hinreichend bekannt und vielfach veröffentlicht [34]-[59]. Insbesondere Ghorab [40], Metha [41], Taylor [42] und Scrivener [51], [49], Glasser [52]-[54], Damidot [55], Collepardi [39], [56], Odler [57] und die Thaumasite Expert Group [58] veröffentlichten Grundlagen zur Bildung von Monosulfat, Ettringit bzw. Thaumasit. Am F. A.-Fingerinstitut Weimar trugen Stark [59], Ludwig [60] Bollmann [61], Nobst [62], [33], Bellmann [32], [63]-[67] und Mulenga [68] zur Aufklärung der Bildungsbedingungen beider Schadminerale bei. Mineralogische Untersuchungen zum Aufbau von Ettringit und zum Einbau von Fremdionen in Ettringit sind vor allem von Pöllmann [69], [70], Neubauer und Götz-Neunhoeffler [53] bekannt.

2.1.1 Ettringitbildung

Ettringit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) bildet sich im Frühstadium der Portlandzementhydratation und ist nur so lange stabil, wie ausreichend Sulfat (aus Abbinderegler und Klinker) zur Verfügung steht. Er besitzt eine trigonale Kristallstruktur und besitzt in der Regel eine nadelförmige Morphologie. Da das Sulfatangebot im Zementstein für eine vollständige Ettringitbildung niemals ausreicht, werden anschließend sulfatärmere Phasen gebildet (Monosulfat, C_4AH_{13} , C_2AH_8 , C_3AH_6 ¹). Diese liegen in der Bindemittelmatrix vor und können

¹ Für derartige Phasenbezeichnungen wird in der Zementchemie üblicherweise die *oxidische Schreibweise* angewendet, dabei steht:
C für CaO

bei Sulfatzufuhr erneut Ettringit bilden. Die damit verbundene Volumenexpansion bewirkt eine Zerstörung des Gefüges, so ist z. B. die Reaktion



mit einer Volumenexpansion um das 4,8fache verbunden. Dies führt zur Bildung von Mikrorissen, in die dann verstärkt Sulfationen eindringen können, wodurch die Schadreaktion beschleunigt wird. Aufgrund seines sehr hohen C_3A -Anteils ist Weißzement für diese Reaktionen besonders prädestiniert und darf dementsprechend nie in Verbindung mit Gips gebracht werden. Eine Ergänzung von Gipsstück mit Weißzement ist folglich grundsätzlich auszuschließen!

Auch C_3A -arme und „ C_3A -freie“ Zemente besitzen mit der Klinkerphase $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$ immer noch ein Reaktionspotential. Das in der Ferritphase des Zementklinkers ($\text{C}_2\text{A},\text{F}$) vorhandene Aluminat steht auch für die Ettringitbildung zur Verfügung [71]. Selbst das aluminatfreie C_2F als Endglied der Mischungsreihe „ C_2A “ ... C_2F ist in der Lage einen eisenhaltigen „Ettringit“ zu bilden.

Für die Umwandlung der primär gebildeten Calciumaluminathydrate und Calciumaluminatsulfathydrate in sekundär gebildetes Trisulfat mit schädigenden Folgen werden je nach Bildungsbedingungen verschiedene Fachtermini im Bereich der Betondauerhaftigkeit genutzt [61]. Im WTA-Merkblatt „Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden“ [1] wird die sekundäre Bildung von Ettringit infolge der Zufuhr von Calciumaluminat und Wasser in ein gipshaltiges Mauerwerk als „Nachträgliche Ettringitbildung“ definiert.

Die stärksten Schädigungen im sulfathaltigen Mauerwerk traten immer in Verbindung mit dünnflüssigen zementhaltigen Injektionen, welche mit hohem Druck in dieses Mauerwerk gepresst wurden, auf.

Dabei wurde dem sulfathaltigen Mauerwerk mit dem Calciumaluminat aus dem hydratisierten Zement ein Reaktionspartner und mit dem Wasser aus dem Injektionsmörtel sowohl ein Reaktionspartner *als auch* ein Transportmittel für Sulfationen bereitgestellt.

Den meisten Einflussgrößen wird heute in Betonnormung und Betonbaupraxis Rechnung getragen [1]. Insbesondere die temperaturabhängige „Sekundäre Ettringitbildung“ (SEB) ist heute gut charakterisiert und wird bei Beachtung der relevanten Richtlinien vermieden [95] bis [98]. Für sulfathaltiges Mauerwerk existiert keine derartige Normung.

Durch die starke Volumenzunahme bei der Bildung von Ettringit im sulfathaltigen Mauerwerk kommt es zu Gefügeschädigungen in den Mauerwerkskomponenten. Dies zeigt sich oft zuerst durch Rissbildungen und Abplatzungen. Läuft die Reaktion ungehindert weiter ab, kann die vollständige Zerstörung eines Mauerwerkverbandes die Folge sein. Beispiele hierfür sind Teileinstürze der Runneburg in Weißensee [29], [72]-[75].

A für Al_2O_3

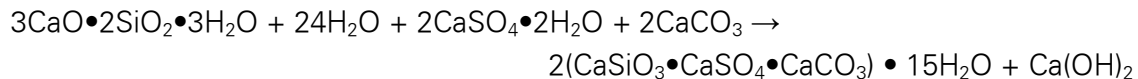
F für Fe_2O_3 und

H für H_2O .

Diese Bezeichnungen werden im Folgenden für Phasenbezeichnungen ebenfalls verwendet.

2.1.2 Thaumasilbildung

Thaumasit ($\text{Ca}_6[\text{Si}(\text{OH})_6]_2(\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) kann sich im Gegensatz zu Ettringit auch ohne aluminathaltige Zementphasen bilden. Neben C-S-H-Phasen, welche in den Hydratationsprodukten von Bindemitteln mit hydraulischen Anteilen immer vorhanden sind, benötigt die Thaumasitbildung Carbonat- und Sulfationen in wässriger Lösung. Die Thaumasitbildung bewirkt die Zersetzung der festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen aus den hydraulischen Bindemittelkomponenten und somit eine Entfestigung des Mörtelgefüges:



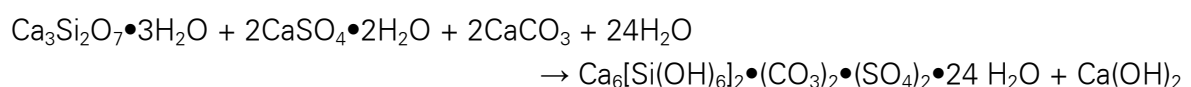
Neben C-S-H-Phasen benötigt die Thaumasitbildung Carbonat- und Sulfationen in wässriger Lösung. Sulfationen sind im sulfathaltigen Mauerwerk bei entsprechender Feuchte immer vorhanden. Carbonationen können z.B. durch ungeeignetes Injektionsmaterial ins Mauerwerk gelangen. Beispiele hierfür sind Fertigmörtel mit einem Anteil Kalksteinmehl (Zumahlstoff, Füller). Aber auch bei einigen CEM II-Arten kann ein hoher Anteil Kalksteinmehl enthalten sein. Ferner können alle Normzemente bis zu 5 M.-% Nebenbestandteile enthalten, unter denen sich oft Kalksteinmehl befindet. Bei Anwesenheit von Sulfat, reaktionsfähigem SiO_2 oder C-S-H-Phasen aus dem Zementstein und reaktionsfähigem CaCO_3 (Kalksteinmehl) ist eine Thaumasitbildung immer möglich. Aluminat ist bei der Thaumasitbildung kein Reaktionspartner, wirkt aber katalytisch. Die Abhängigkeit der Thaumasitbildung vom Al_2O_3 -Gehalt bei tiefen Temperaturen erfolgt bei Portlandzementen, Portlandhüttenzementen und Hochofenzementen linear [33]. Ein CEM III ist daher für den Einsatz im sulfathaltigen Mauerwerk [29], [73] nicht geeignet.

Eine Thaumasitbildung ist nur durch eine konsequente Vermeidung von reaktiven CaCO_3 -Komponenten in der Mischung zu unterbinden. Im sulfathaltigen Mauerwerk ist die Thaumasitbildung durch die Verwendung von RS-Zement (HS-Zement) mit einem $\text{C}_3\text{A} < 3\%$ nicht auszuschließen, sondern wird lediglich verzögert (das gilt auch für Hochofenzement).

Thaumasit bildet sich bevorzugt bei Temperaturen zwischen 0°C und 15°C und hohem Feuchtigkeitsangebot. Bellmann [32] berechnete die Möglichkeiten der Thaumasitbildung aus thermodynamischer Sicht. Nach Bensted [44] werden für den äußeren Sulfatangriff zwei Bildungswege beschrieben:

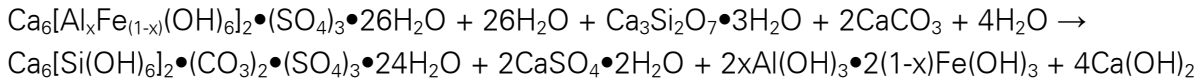
Direkter Weg

Thaumasit bildet sich aus Sulfat (Gips, Halbhydrat, Anhydrit oder andere lösliche Sulfatverbindungen), Carbonat (reaktive carbonatische Zuschlag- und/oder Zumahlstoffe), Silicat (Calciumsilicathydrate, unreaktierte silicatische Ausgangsstoffe) und Wasser. In der Literatur überwiegt die Meinung, daß Thaumasit auf diesem Weg nur bei Anwesenheit von Aluminat gebildet wird, auch wenn dies nur sehr geringe Mengen sind [33], [34]. Diese Bedingung wird in der Regel bei allen Zementen, selbst bei C_3A -freien, erfüllt, da Aluminat in $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$ und in geringen Anteilen in die Calciumsilicatphasen eingebaut wird.



Indirekter Weg (Woodfordit-Weg)

Im Gegensatz zum direkten Weg reagieren hier Sulfationen mit Ettringit, Silicat und Carbonat in Gegenwart von Calciumionen und Wasser. Dabei entsteht ein siliciumhaltiges Ettringit (Woodfordit) bzw. ein Glied der Mischkristallreihe mit den Endgliedern Ettringit und Thaumasil. Die Silicate werden dabei ebenfalls den Calciumsilicathydraten entzogen:



Der indirekte Weg über Woodfordit führt schneller zu Thaumasil als der direkte Weg. Praktisch laufen beide Reaktionen in technischen zementären Systemen unabhängig voneinander ab.

Das derzeit wohl bekannteste Beispiel für eine fehlgeschlagene Sanierung mit Thaumasilbildung in der Folge ist das Schloss Wiehe [75] - [79].

Eine Zusammenfassung der Einflüsse auf die Schädigungen sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf eine schädigende Ettringit- und Thaumasilbildung

Einfluss auf eine schädigende Ettringitbildung haben:

- Zusammensetzung des Zements (C₃A- und C₂(A,F)-Gehalt, Zumahlstoff, Fremdionen)
- Art- und Menge des Sulfats (Zement, Zuschlag, Umgebung)
- W/Z-Zementwert
- Vorschädigungen des Gefüges (Mikrorisse)
- Temperatur
- pH-Wert der Porenlösung bzw. Zusammensetzung der Porenlösung

Einfluss auf eine schädigende Thaumasilbildung haben:

- Zusammensetzung des Zements (Zumahlstoff)
- Art- und Menge des Sulfats (Zement, Zuschlag, Umgebung)
- Gehalt an reaktivem Carbonat (Zementnebenbestandteil, Zumahlstoff, Gesteinskörnung)
- W/Z-Zementwert
- Vorschädigungen des Gefüges (Mikrorisse)
- Temperatur
- pH-Wert bzw. Zusammensetzung der Porenlösung

3 Optimierung der Verpresstechnologie

3.1 Pumpfähigkeit der Suspensionen

Zunächst sollte durch Verfüllen von Röhren die Pumpfähigkeit der Suspension und das Verhalten gegenüber porösen Materialien simuliert werden. Der Versuchsaufbau ist aus Bild 6 zu ersehen.



Bild 6 *Links sind vier HT-Rohre mit Schlauchanschlüssen zu sehen. In diese Rohre wird das poröse Substrat – in diesem Fall Ziegelbruch – eingefüllt (rechts im Bild).*

In die HT-Rohre (Durchmesser 45 mm, Länge 54 cm) wurden nach unten mit einem Gummi-Flansch mit Schlauchauslass abgeschlossen. In das Rohr kam das zu testende Substrat. In der Praxis muss man das Material gewählt werden, aus dem das zu verpressende Mauerwerk besteht. Für den Versuch wurde Ziegelsplitt (15/30 mm) gewählt. An die Schlauchenden wurde mit einer Verpresspumpe (Handhebelpumpe DESOI HP-60ZD) die zu prüfende Mörtelsuspension eingepresst, bis 2 cm unter der oberen Rohrkante. Der verpresste Zylinder hatte eine Länge von 50 cm.

Als Mörtel wurden für die Versuche zwei konventionell erhältliche Verpressmörtel verwendet:

- Mapei Antique I
- Röfix HK-I

Nach dem Aushärten der Masse wurden die Rohre mit einer Steinsäge trocken der Länge nach aufgesägt (Bild 7).



Bild 7 *Aufgesägte Rohren nach dem Verpressversuch*

In den Rohren kann man die Verteilung des Verpressgutes, die Anhaftung an die Komponenten und auch eventuelles Schwinden des Verpressgutes gut beurteilen.

3.2 Überprüfung der Schwind- und Sedimentationsneigung

Ein weiterer einfacher Test mit Rohren wurde für die Ermittlung des Sedimentierens des Verpressgutes durchgeführt.

In unten geschlossene HT-Rohre wird von oben der Injektionsschaummörtel eingefüllt. Im Bild 8 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Die HT-Rohre sind 50 cm lang, das entspricht dem Verfüllraum des vorigen Versuchs. Abgedichtet wurden die Rohre mit einer Plastikfolie und einem Gewebeband.

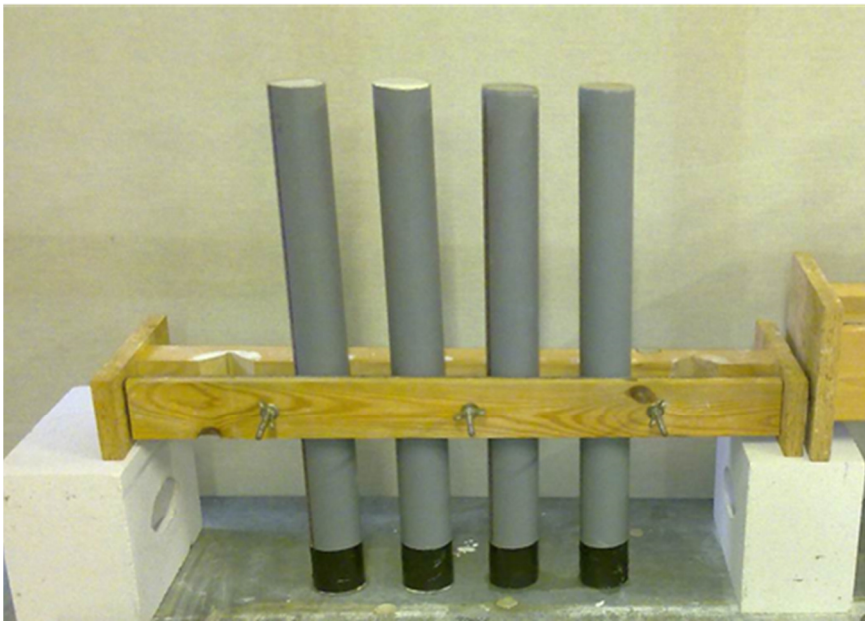


Bild 8 *In die nach unten verschlossenen Rohre wird das Injektionsgut gefüllt und verbleibt dort bis zur Aushärtung*

Die Rohre wurden bis oben mit Injektionsmasse gefüllt und glatt abgestrichen. Nach dem Aushärten lässt sich eventuelles Schwinden leicht messen. Die Mörtelzylinder lassen sich in der Regel leicht aus den Rohren schieben. Ansonsten werden die HT-Rohre trocken mit der Steinsäge der Länge nach aufgesägt. Nach dem Zerteilen lässt sich an der Sägefläche erkennen, ob es zur Sedimentation der Mörtelzuschläge oder zum Aufsteigen von Luftblasen gekommen ist. Im folgenden Bild 9 ist das obere und untere Ende eines Zylinders dargestellt. Es sind kaum Poren zu erkennen, der Schaummörtel ist ziemlich stark in sich zusammengefallen. Aber man erkennt, dass im oberen Teil mehr größere Poren sichtbar sind.



Bild 9 *Oberes und unteres Ende eines aufgesägten Mörtelzylinders*

Mit dieser einfachen Methode lassen sich ebenfalls schnelle Aussagen zum Verhalten des Injektionsmörtels treffen. Zunächst kann leicht ein eventuelles Schwinden nachgewiesen werden, dann lässt sich feststellen, ob der Zuschlag zum Sedimentieren neigt oder ob die Suspension bis zum Aushärten stabil bleibt. Und bei Verwendung eines Schaummörtels kann die Verteilung von Poren Aufschluss darüber geben, ob der Schaum stabil blieb, wie die Poren verteilt sind und ob es eventuell zu einem Aufschwimmen der größeren Poren gekommen ist.

Die in [94] beschriebene Methode zum „Prüfverfahren zur Bestimmung der Injektionsfähigkeit durch Injektion in eine Sandsäule“ beschreibt im Grunde einen ähnlichen Versuchsaufbau, wie der mit den von unten zu befüllenden Rohren, allerdings wird in dem Verfahren nicht gebrochenes Substrat verwendet, sondern Sand. Das Rohr hat zudem einen viel geringeren Durchmesser (22,2 mm) und ist nicht so hoch. Der eingefüllte Sand wird außerdem verdichtet. Dieses Prüfverfahren nach DIN wird auch von Bicer-Simsir & Rainer [101] (S. 11) für die Evaluierung von Injektionsmassen für Restaurierungszwecke empfohlen. Allerdings wird in diesem Manual für die Wandmalereirestaurierung von viel kleineren Injektionsmengen und viel kleineren Rissbreiten ausgegangen.

Im Gegensatz zu dem Prüfverfahren nach DIN erscheinen die hier vorgestellten Tests für die angestrebten Anwendungen – nämlich Verpressen von historischem Mauerwerk – einfacher realisierbar außerdem entspricht der Füllung von Hohlräumen mit Schotter eher den am historischen Mauerwerk zu beobachtenden Schäden.

3.3 Beobachtung des Verpressvorganges

Ähnliche, wie das hier vorgestellte Verfahren, werden im Bereich der substantiellen Sanierung historischer Gebäude größere Versuchsaufbauten vorgeschlagen. Uranjek et al. [100] und Jorne et al. [99] beschreiben Zylinder mit grober Gesteinsbruchfüllung. Die von der Arbeitsgruppe verwendeten Zylinder sind 15 cm im Durchmesser und 30 cm hoch und aus Acrylglas, sie lehnen sich damit den Zylindern aus der ASTM C943-10 [102] an. Die Zylinder sind seitlich aufgeschlitzt, damit der ausgehärtete Mörtelzylinder entnommen werden kann. Dieser Mörtelzylinder kann dann, der Länge nach aufgeschnitten, weiter untersucht werden. So kann die Verteilung von Komponenten und Injektionsmörtel sowie das Anbinden von Mörtel an die Komponenten beurteilt werden. Bei Schaummörtel lassen sich die Blasengröße, -verteilung und -konzentration feststellen. Der Zylinder lässt sich aber auch als Probestück für Druckfestigkeitsversuche verwenden. Im Bild 10 ist ein erster Prototyp für Verpressversuche von Hohlräumen mit Substratfüllung zu sehen. Solche Hohlräume kommen im Mauerwerk mit starker Risschädigung oftmals vor.



Bild 10 *Prototyp aus Acrylglas für Versuche zum Verpressen von Hohlräumen mit Substratfüllung*

Der Acrylglaszylinder ist 15 cm im Durchmesser und 30 cm hoch. Er kann je nach zu prüfendem Substrat gefüllt werden. Oben und unten wird er von einer PVC-Platte abgeschlossen.

Der Einlauf befindet sich unten und ist mit dem Kupplungssystem der Firma DESOI ausgeführt. Dadurch lässt sich die Verpresszange mit Schlauch und Manometer leicht anschließen. Die Durchlässe entsprechen dadurch auch den in der Praxis zu verwendenden Durchmessern.

Das größere Volumen von etwa 5,3 l lässt sicherere Aussagen über den Presserfolg zu. In diesem Volumen lässt sich das Substrat außerdem gestuft einbringen. Beispielsweise unterschiedliche Korngrößen in Lagen.

3.4 Prüfung der Fließfähigkeit von Suspensionen

Zum Feststellen der Fließfähigkeit wird üblicherweise der Test nach DIN EN 1015-3 [103] mit dem Ausbreittisch nach Haegemann angewandt. Dieses Verfahren ist jedoch im laufenden Baustellenbetrieb schlecht einzusetzen.

Aus der Wandmalereirestauration sind einfache aber aussagekräftige Fließtests über Glasplatten bekannt. Diese im Bild 11 zu sehenden Aufbauten sind für sehr feinkörnige Suspensionen gut geeignet. Man kann leicht unterschiedliche Fließverhalten miteinander vergleichen. Die einfache und günstige Konstruktion macht dieses Verfahren für Baustellentests geeignet. Man benötigt lediglich eine längliche Glasplatte, einseitige Unterbauten um den Neigungswinkel einzustellen und dann lassen sich mehrere Injektionsmaterialien in ihrem rheologischen Verhalten miteinander vergleichen.

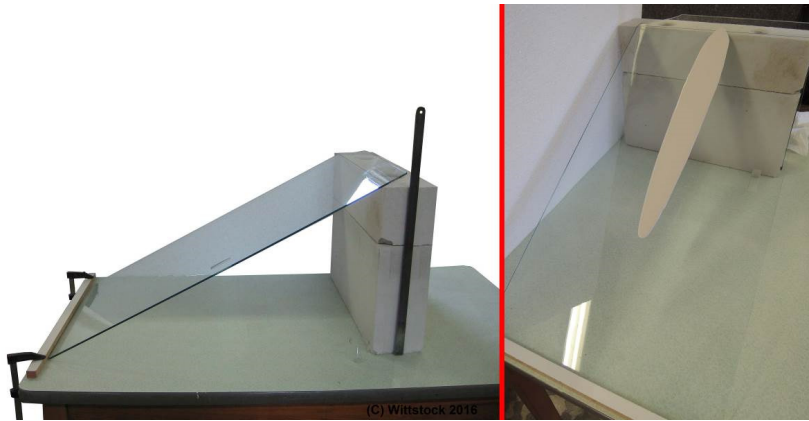


Bild 11 *Fließversuche auf einer geneigten Glasplatte.*

Soll das Injektionsgut in einer porösen Umgebung auf seine Fließfähigkeit getestet werden, dann haben sich Platten mit Rinnen aus mineralischem Material bewährt. Das Umgebungsmaterial ist dabei den vorhandenen Baumaterialien anzupassen. In Bicer-Simsir & Rainer [101] (S. 76/77) werden solche Tests vorgestellt. Diese konnten mit gutem Erfolg im Prüflabor nachvollzogen werden.

Im Bild 12, links ist auf einer Holzplatte ein etwa 3 cm dicker Putzauftrag zu sehen, der mit unterschiedlichen Werkzeugen rillenförmig ausgeschabt wurde. Die Rillengeometrien sind in im Bild 12 rechts zu sehen. Je nach Werkzeug sind sie rund, keilförmig oder in Form eines rechteckigen Kanals ausgeführt.



Bild 12 *Putzplatte mit unterschiedlichen Rillengeometrien zum Ermitteln der Fließfähigkeit in porösen Medien*

Im Praxistest wird die Platte gekippt aufgestellt, der Winkel ist dabei variabel. Es hat sich gezeigt, dass die eingebrachten Mörtel, je nach Konsistenz, unterschiedlich weit fließen. Im Vergleich zu den Tests auf der Glasplatte konnte ein Einfluss des porösen Untergrunds auf die Fließeigenschaften festgestellt werden. Der Test ist somit, wegen seiner besseren Annäherung an die tatsächliche, im Mauerwerk gegebene Umgebung, eher geeignet das Fließverhalten von Injektionsmassen zu beurteilen.



Bild 13 *Marsh Trichter mit genormtem Auslass und 1 Liter Becherglas und Stoppuhr*

Ein weiterer, relativ einfach durchzuführender Test ist der Fließtest mit dem Marsh-Trichter (Bild 13). Der Test nach ASTM [104] bzw. DIN EN 445 [105] wurde ursprünglich für die Evaluierung von Tonsuspensionen zur Bohrlochspülung entwickelt und genormt, er hat sich jedoch auch auf dem Feld der Injektionstechnik etabliert [74], [16].

Die Geometrie und vor allem der Durchmesser des Auslaufs sind genau festgelegt ($d = 4,76 \text{ mm}$). Dadurch ergibt sich ein definierter Versuchsaufbau, bei dem die Zeit gemessen wird, in der ein Liter der Suspension durch den Trichter läuft.

Anhand der Zeiten lassen sich unterschiedlichen Injektionsmassen vergleichen.

Bestimmung des Fließmaßes nach DIN EN 13279-2

Für die Versuche zur Ermittlung eines geeigneten Injektionsmörtels wurde auf Grund der Materialzusammensetzung das Fließmaß nach oben genannter Norm bestimmt. Dieses Verfahren erwies sich als sehr praktikabel für die Versuche im Labor. Das angestrebte Fließmaß für die Versuche betrug 240 – 260 mm.

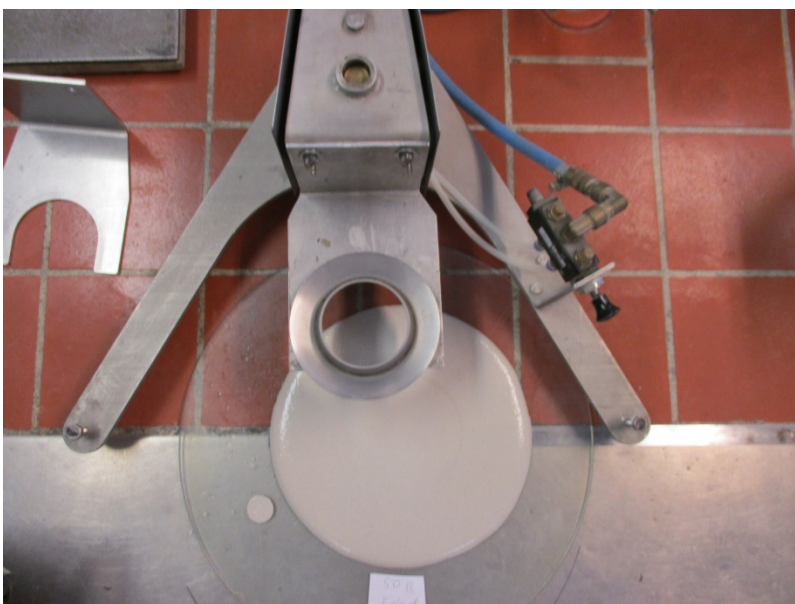


Bild 14 *Bestimmung des Fließmaßes an einer Gipsmörtelmischung*

3.5 Optimierung Schaumtechnologie

In Schaummörteln kommt dem Schaum eine zentrale Rolle zu. Der Schaum ersetzt Zuschläge, dadurch wird die Dichte des Mörtels reduziert. Außerdem kann durch das Einbringen von Schaum der Wassergehalt gemindert und die rheologischen Eigenschaften des Mörtels verbessert werden. Nach Diskussionen mit Herrn Kayser von der Firma SITA/Dresden über die Anwendung von Schaum innerhalb des Forschungsprojektes sollten für einen stabilen Schaum zwei Eigenschaften erfüllt sein. Der Schaum sollte möglichst feinporig und trocken sein. Die Feinporigkeit wird beim Schäumen mit einem Rührwerk durch das Einbringen von möglichst hohen Scherkräften innerhalb kurzer Zeit erreicht. Herr Kayser spricht dabei von einer steilen Beschleunigungsrampe des Rührers, d.h. dass der Rührer möglichst schnell auf eine hohe Drehzahl beschleunigt wird. Dadurch lassen sich die Scherkräfte optimal auf das Schaummittel übertragen und es kommt zum Einbringen von Luft und damit zum Aufschäumen. Wird der Rührer langsam beschleunigt, dann kommt es zum Anrühren des Schaummittels, d.h. die ganze Flüssigkeit wird mitgedreht und es kommt nicht zum Lufteintrag. Die Firma SITA hat ein Prüfgerät entwickelt, mit dem Schaummittel untersucht werden können. Es wird hauptsächlich für Schäume in der Kosmetik und bei Reinigungsmitteln eingesetzt. Als Beispiele seien die unterschiedlichen Schäume von Rasier- und Badeschaum genannt. Beides sind Schäume, jedoch mit unterschiedlichsten Eigenschaften. Bei dem genannten Schaumtester wird durch möglichst schnelles Beschleunigen eines speziell entwickelten Rotors ein Schaum aufgebaut. Es wird das mit einer gewissen Menge erreichbare Volumen an Schaum gemessen und dann das Zusammenfallen des Schaumes im Verlauf der Zeit. Im Bild 15 links sieht man den Glaszylinder mit dem von SITA entwickelten Schaumrotor. Rechts ist eine ermittelte Kurve für den Schaumbildner Oxal PLB 6 als 2,5%ige Lösung dargestellt.

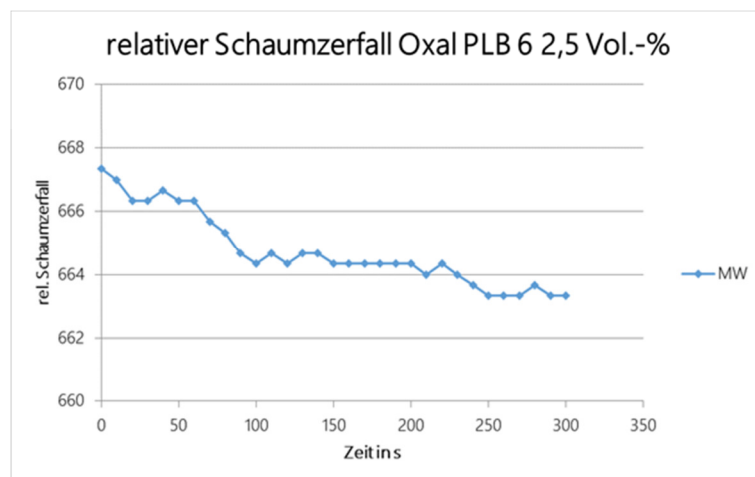
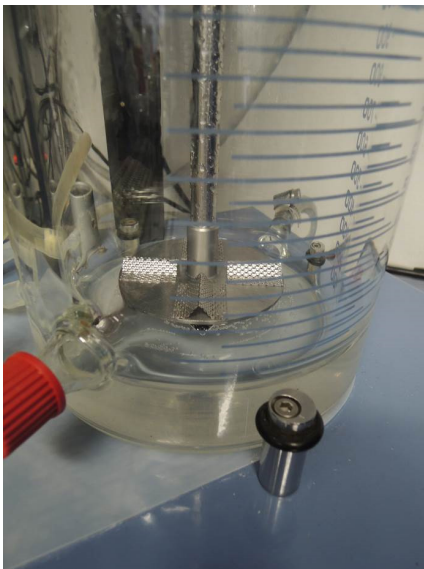


Bild 15 Links Glaszylinder des Schaumtesters der Firma SITA/Dresden mit speziell geformtem Rotor; rechts Kurve die den relativen Schaumzerfall des Schaummittels OXAL PLB 6 in 2,5 Vol.-% Wasserverdünnung darstellt

Nach einer Aufschäumzeit von 30 Sekunden, bei einer Drehzahl des Rotors von 1100 U/min wurde aus 250 ml Schaummittellösung 667,5 ml Schaum generiert, also etwa das 2,7 fache. Dieser wurde dann über 300 Sekunden beobachtet. Durch Drainageeffekte „trocknet“ der Schaum aus, d.h. die Flüssigkeit in den Schaumlamellen wird durch die Schwerkraft nach

unten abgeleitet. Der Schaum wird leichter, trockener und er fällt dabei in sich zusammen. In der Kurve erkennt man, dass der Schaum nach 300 Sekunden, also 5 Minuten, von 667,5 auf 663,5 Milliliter reduziert wurde. Der in diesem Zeitrahmen eingesetzte Schaumzerfall von 0,6 Vol.-% kann als sehr gering eingestuft werden. Bei dem eingesetzten Schaummittel handelt es sich – nach den Aussagen von Herr Kayser/SITA - somit um einen sehr stabilen Schaum, das Schaummittel ist demnach gut als Ausgangsmaterial für die Tests geeignet.

Zur Optimierung eines baustellentauglichen Schaumes wurde in Zusammenarbeit mit einem Vertreter der Firma Collomix ein Versuchsprogramm entwickelt und dieses gemeinsam durchgeführt. Herr Schönfeld, Gebietsleiter für Sachsen, schlug aufgrund seiner Erfahrung mit Rührwerken und Rührern einen Test von folgenden Rührern vor (Bild 16).

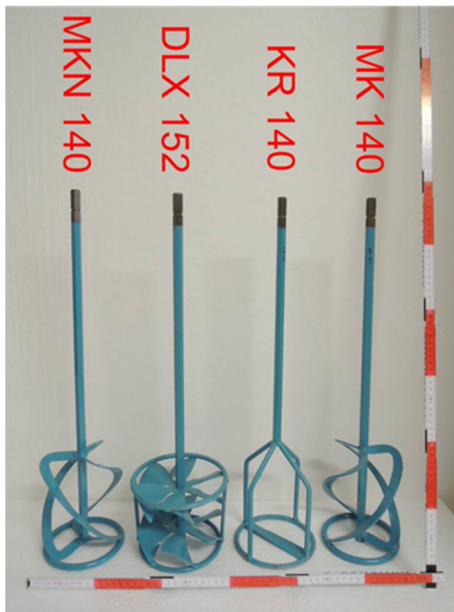


Bild 16 *Rührer von Collomix für Tests zur Optimierung der Schaumbildung*

Die beiden Rührer links und rechts – MKN 140 und MK 140 sehen zunächst sehr ähnlich aus, sie unterscheiden sich jedoch darin, dass der eine MKN-Rührer das Schaummittel beim Drehen im Uhrzeigersinn nach unten drückt, er ist deshalb auch für flüssige Medien gedacht, wo es darauf ankommt, dass es beim Rühren nicht zu Spritzern kommt. Der MK-Rührer entgegen fördert beim Drehen das Schaummittel entlang der Achse nach oben. Es entstehen bei den zwei Rührern zwei gegensätzliche Strömungen. Der Rührer DLX 152 bringt durch seine zwei Rotoren mit verschränkten Blättern hohe Scherkräfte in das Schaummittel. Der Rührer KR 140 durch seine einfache Geometrie eher weniger.

Alle vier Rührer wurden bei zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten mit dem Schaummittel OXAL PLB 6 in 2,5 Vol.-%iger Wasserverdünnung getestet. Zur Evaluierung des erreichbaren Schaumvolumens wurde immer dieselbe Menge an Schaummittel vorgelegt. In einem großen Eimer wurden jeweils 2 l Schaummittel 2 min aufgeschäumt. Über die Höhe des Schaumes im Eimer wurde die Schäumleistung in Liter bewertet. Es kamen die vier vorgestellten Rührer von Collomix zum Einsatz und zwei unterschiedliche Rührwerke. Zum einen ein Handrührgerät von Collomix (X04/1300W/620 U/min) und eine Handbohrmaschine von DeWalt (D21570/1300W/3500 U/min). In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 2: mit unterschiedlichen Rührern erreichtes Schaumvolumen

		Schaumvolumen [l] nach 2 min Rühren			
Rührwerk	U/min	MKN 140	DLX 152	KR 140	KN 140
Collomix X04	620	22	28	22	23
DeWalt D21570	3500	24	32	23	25

Generell werden bei höheren Drehzahlen erwartungsgemäß größere Schaumvolumen erreicht. Das bedeutet gleichzeitig, dass der Schaum sowohl trockener als auch feinporiger ist. Das beste Ergebnis wurde in der Kombination von schnell drehendem Rührwerk mit dem Rührer DLX 152 erzielt. Für die weiteren Versuche wird diese Gerätekombination beibehalten.

Die, sehr einfach über die Volumenmessung des Schaums, erzielten Messergebnisse konnten durch weitere, parallel vorgenommene Untersuchungen bestätigt werden. Zum einen wurde von dem produzierten Schaum jeweils ein Becherglas mit einem Liter Inhalt befüllt. An dem Becherglas kann beobachtet werden, wie der Schaum drainiert. D.h. wie sich in Abhängigkeit von der Zeit Flüssigkeit am Boden ansammelt. Auffällig dabei war, dass das Schaumvolumen nicht abgenommen hat, der Schaum aber jeweils trockener wurde. Im Bild 17 sieht man beispielhaft, dass sich nach 40 min Stehzeit ein etwa 2 cm hoher Flüssigkeitsspiegel eingestellt hat, dass der Schaum aber nicht zusammengefallen ist.

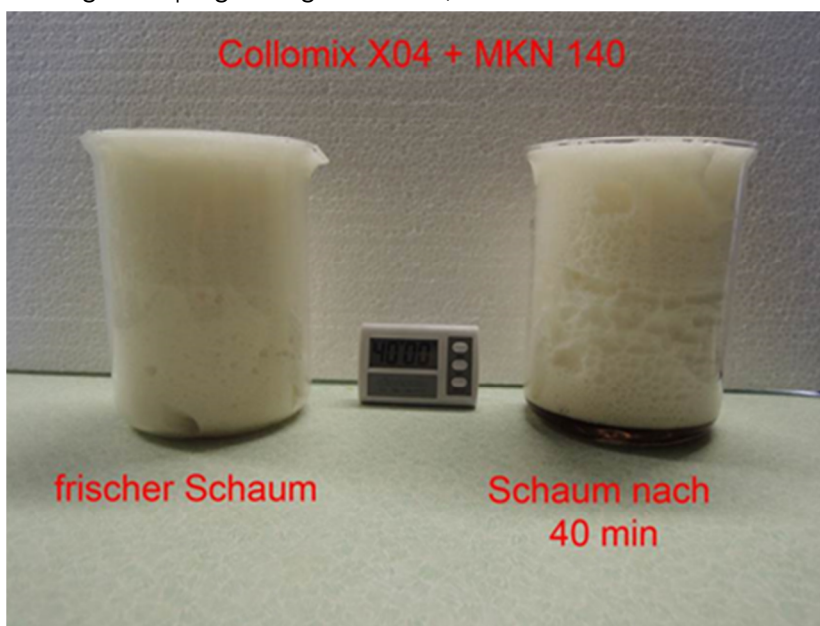


Bild 17 Drainage des Schaumes nach 40 Minuten, Schaumbildner OXAL PLB 6

In dem rechten Becherglas kann man ebenfalls eine Vergrößerung der Poren feststellen. Durch den Drainageeffekt kommt es zum Platzen der zu dünnen Porenwandungen, aus zwei kleineren Poren wird eine größere.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nicht jeder Mörtelquirl auch gute Schaumergebnisse bringt. Es kommt darauf an, mit möglichst hoher Drehzahl möglichst hohe Scherkräfte in das Schaummittel zu leiten. Nur dann wird ein feinporig stabiler Schaum gebildet, der anschließend mit dem Mörtel vermischt werden kann. Mörtelrührgeräte sind in der Regel zu niedertourig. Wohingegen die meisten hochtourigen Bohrmaschinen nicht genügend Leistung aufweisen, um später dann auch den Mörtel anzumischen und den Schaum einzuarbeiten. Aus diesem Grund ist es günstig, unter optimalen Bedingungen zwei Geräte (Bild 18) für die separate Mörtel- und Schaumherstellung einzusetzen beziehungsweise für die Schaumbildungen einen Schaumgenerator zu nutzen.

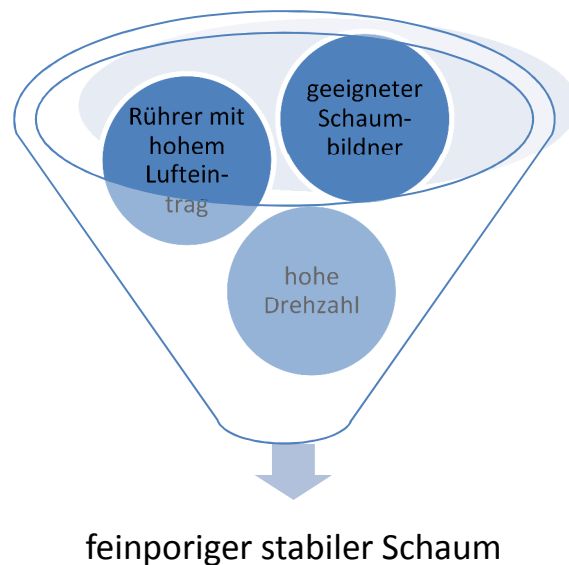


Bild 18 *Einflüsse auf die Schaumbildung*

4 Prüfung der Sulfatbeständigkeit von Materialien auf unterschiedlicher Bindemittelbasis

4.1 Tests zur Prüfung der Sulfatbeständigkeit

Baumaterialien wie Mörtel oder Steine sind poröse Systeme, in denen Feuchtigkeit zirkuliert. Mit der Feuchtigkeit werden auch lösliche Ionen transportiert und umgelagert. Die im gipshaltigen Mauerwerk in unbegrenzter Menge vorhandenen Sulfationen stellen bei entsprechendem Wassergehalt ein beträchtliches Schadenspotential in Bauwerken dar, da diese, mit den passenden Kationen, bauschädliche Salze oder Treibminerale bilden.

Das bekannteste Salz dieser Gruppe ist Gips (Reaktion aus Halbhydrat oder Anhydrit), gefolgt von Ettringit, Thaumasit, Thenardit und Mirabilit und vielen anderen. Je nach Kationenangebot und Klima können sich entsprechende Minerale bilden. Diese führen durch ihr Wachstum zu Drücken im Porenraum. Der beständige Druck wird durch Rissbildung abgebaut, das Baumaterial wird geschädigt und versagt in absehbaren Zeiträumen. Eine Ausnahme ist die Bildung von Thaumasit. Bei dieser Reaktion werden die festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen von hydraulischen Mörteln zersetzt und es kommt zu einem vollständigen Festigkeitsverlust der Mörtelmatrix.

Generell lassen sich zwei unterschiedliche Sulfatangriffe auf Bauteile unterscheiden. Einmal ein „**Äußerer Sulfatangriff**“ und daneben ein „**Innerer Sulfatangriff**“.

Beim äußeren Sulfatangriff geht man von einem Einfluss sulfathaltiger Wässer aus, die aus Böden oder dem umliegenden Gestein freigesetzt werden. Das heißt das Material eines Bauwerks wird von außen durch eine mehr oder minder kontinuierlichen Sulfatquelle belastet.

Im Gegensatz dazu wird beim Inneren Sulfatangriff im Baumaterial vorhandenes Sulfat freigesetzt und beeinflusst die Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Die Quelle für den inneren Sulfatangriff können sowohl die Bausteine, beispielsweise Gipsquader, oder gipshaltiger Mörtel aber auch eine sulfathaltige Gesteinskörnung im Beton sein (zum Beispiel Pyrit).

Bei der Sanierung und Restaurierung von historischem Mauerwerk und Architekturoberflächen mit einer nachgewiesenen Sulfatbelastung wird oftmals eine Verwendung von sulfatbeständigen Mörteln gefordert.

Zemente mit hohem Sulfatwiderstand werden mit „SR“ (früher „HS“) [80] gekennzeichnet.

Auf dem Markt befindliche SR-Zemente, werden nach DIN EN 1045 und DIN 4030 auf ihre Sulfatbeständigkeit geprüft und zertifiziert.

„Die Kennzeichnung SR gilt für Portlandzemente mit begrenztem C_3A - und Al_2O_3 -Gehalt sowie für hüttensandreiche Hochofenzemente (DIN EN 197-1).“ Sie bezieht sich auf Zemente für Betone, die in sulfathaltigen Böden und Wässern eingesetzt werden (Äußerer Sulfatangriff). *„Sie bezieht sich aber nicht auf die Eignung für den Einsatz der Bindemittel in gipshaltigem Mauerwerk (Innerer Sulfatangriff)“.* [1]

Langzeituntersuchungen im Labor und extreme Schadensfälle zeigen, dass Schäden auch nach der Verwendung von Injektionsmörteln mit Zementen mit einem „hohen Sulfatwiderstand“ auftreten können.

Der gekennzeichnete Sulfatwiderstand der Materialien allein als Auswahlkriterium reicht nicht aus. Zu berücksichtigen sind weiterhin auch andere Bestandteile (z.B. Carbonate, Tonminerale, hydraulische Bestandteile aus Altsanierungen), die neben Gips in Mörteln oder Steinen vorhanden sein können.

Für die Ermittlung der Eignung von Bindemitteln oder Mörteln zur Instandsetzung von gipshaltigem Mauerwerk existiert derzeit kein genormtes Prüfverfahren.

Bei bisherigen Prüfungen wurden sehr unterschiedliche Untersuchungsmethoden, Prüfkörper, Lagerungsbedingungen, Prüfzeiträume, Bewertungsgrenzen und Bewertungsmethoden gewählt [84], [85]. Daher sind die Untersuchungsergebnisse nicht miteinander vergleichbar und auch nur bedingt praxisrelevant.

Nach heutigem Kenntnisstand sind mehrjährige Prüfzeiträume erforderlich. Bei den Prüfbedingungen müssen vor allem spezielle Anforderungen zur Verhinderung eines Inneren Sulfatangriffs berücksichtigt werden.

Diese Sulfatbeständigkeit bezieht sich jedoch immer auf den äußeren Sulfatangriff [10]. Für den inneren Sulfatangriff, mit dem im historischen Gipsmauerwerk zu rechnen ist, gibt es bisher keine gültige Norm [84] jedoch einige ungenormte Tests.

Die Testverfahren für den inneren Sulfatangriff gehen im Wesentlichen auf ein Verfahren zurück, das von Anstett zu Anfang der 1920er Jahre für Zemente entwickelt wurde. WITTEKIND [21] beschreibt das Anstett-Verfahren wie folgt:

„Reiner Zement wird mit 50% Wasser zu einer Paste verarbeitet, die man einige Wochen in feuchter Atmosphäre erhärten lässt. Die Probe wird danach auf etwa 5 mm Korngröße zerkleinert und bei höchstens 40°C getrocknet. Zur getrockneten hydratisierten Zementprobe setzt man 50 Gew.-% Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) zu (Mischung 2:1) und zerkleinert das Gemisch, bis es feiner als 200 μ ist (Sieb von 900 Maschen/cm²). Das Pulver wird mit 6% Wasser angefeuchtet, in eine zylindrische, nicht geölte Form von 80 mm im Durchmesser und etwa 30 mm Höhe gebracht und unter der Druckpresse eine Minute lang mit 20 kg/cm² zusammengepresst. Der Prüfkörper wird dann auf Filterpapier gelegt, dessen überstehende Teile in Wasser tauchen und luftdicht abgedeckt.“

Anstett empfahl, den Durchmesser der Proben nach 24 Std., 28 und 90 Tagen nachzumessen und verlangt, dass die Quellung 1,25% dabei nicht überschreiten sollte.

Anstett mischte demnach das zu prüfende Material mit Gipsgesteinskörnungen, presste daraus Zylinder und lagerte diese in einer feuchten Umgebung. Durch Mineralneubildung – Stichwort Treibmineralbildung – kommt es zur Volumenexpansion des Prüfkörpers. Diese ist ein Maß für das Schadenspotential der angefertigten Mischung. Die von Anstett vorgeschlagene Probe wird in den unterschiedlichsten Abwandlungen bis heute eingesetzt. Grundprinzip ist immer die innige Mischung von einem zu prüfenden Material und einer Sulfatquelle.

Möglichkeiten der Variationen bestehen bei diesem Test in vielfältigster Art. Einflüsse haben beispielsweise die Mahlfinheit der Komponenten, die Anteile der jeweiligen Stoffe und das Klima in dem die Prüfkörper gelagert werden. Besonders letzteres ist von besonderer Bedeutung. Trockene Lagerung führt naturgemäß zu keiner Mineralneubildung. Zu diesen Prozessen ist Feuchtigkeit unumgänglich. DREUSE & ZIER [86] konnten belegen, dass die Dehnung und damit korrelierend die Schadsalzbildung mit zunehmender Feuchte auch zunimmt. Die größte Dehnung war in Unterwasserlagerung zu bemerken.

Von den Autoren wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass genügend lange Zeiträume einzukalkulieren sind. Je nach Umgebungsbedingungen sind Prüfzeiträume bis zu 10 Jahren und mehr notwendig. Aus den angeführten Möglichkeiten der Variationen wird ersichtlich, dass eine verbindliche Norm für die Tests auf inneren Sulfatangriff, wie er auch von DREUSE & ZIER [84] gefordert wird, dringend notwendig ist. Nur unter dem Begriff Anstett Test lassen sich zu viele, nicht nachvollziehbare Parameter verschieben, die zu gänzlich unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Für innere Sulfatangriffe werden in heutiger Zeit hauptsächlich zwei Prüfverfahren beschrieben:

- Le Chatelier-Anstett-Probe [5]
- Prüfverfahren in den USA nach ASTM C 452 [107]

Bei der **Le Chatelier-Anstett-Probe** [5] wird ein normsteifer Brei aus 100 Teilen hydratisiertem Zementpulver und 50 Teilen Gipspulver hergestellt und dieses in Le-Chatelier Ringe einge-füllt. Der mit einer Glasplatte abgedeckte Ring wird 24 Stunden in Wasser gelagert und dann der Abstand der Nadelspitzen gemessen (Nullmessung). Im Folgenden wird der sich vergrößernde Abstand der Nadelspitzen als Resultat einer Dehnung täglich ermittelt. Der Versuch wird in STÜRMER [74] ebenfalls vorgestellt und für nicht sehr geeignet erachtet. STÜRMER empfiehlt eher den Prismentest, also eine Messung der Längenänderung an Normprismen 4 x 4 x 16 cm nach DIN 52450.

Der **Test nach ASTM C 452** [107] wird für die Sulfatbeständigkeit von Portland Zement empfohlen. Dabei wird der zu prüfende Zement mit einem sehr reinen, natürlichen Gipspulver gemischt und angemacht. Das Gipspulver sollte kleiner 150 µm sein und der Anteil zum Zement so eingestellt werden, dass 7 M.-% SO₃ in der Mischung enthalten sind. 400 g Zement/Gipsmischung werden mit 1100 g Normsand gemischt und mit 194 ml Wasser angemacht. Der Mörtel wird anschließend in Prismenformen mit der Größe 25 x 25 x 285 mm gefüllt. Nach 22 bis 23 Stunden in 100% Luftfeuchtigkeit werden die Prismen ausgeschalt und 3 min unter Wasser gelagert. Danach wird die erste Längenmessung ausgeführt und die Prismen anschließend weiterhin unter Wasser gelagert. Die nächste Messung erfolgt nach 14 Tagen. Die ASTM Norm gibt keine Grenzwerte für Sulfatbeständigkeit, es handelt sich um eine reine Messvorschrift.

Da es keine genormten Testmethoden für den inneren Sulfatangriff gibt, wurde an der Materialforschungs und –Prüfanstalt der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA Weimar) ein hausinternes Verfahren entwickelt. Ein Grund dafür war die Beobachtung, dass nach Injektionen mit hydraulischen Bindemitteln in historisches Gips-mauerwerk, ein Schaden oft erst nach 3 bis 15 Jahren festzustellen war. Diesem langsam ansteigenden und dann plötzlich beschleunigenden Schadensverlauf sollte nachgegangen werden. Aus diesem Grund wurden Mörtelprismen (4 x 4 x 16 cm) aus Zementleimen und Gipsgesteinskörnungen bzw. gebrochenem gipshaltigem Mörtel hergestellt und unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen gelagert. Das Verhältnis von Bindemittel (in diesem Fall unterschiedliche Zemente) und gipshaltigem Zuschlag betrug für die Versuche jeweils etwa 2:1. Der Wasser/Bindemittel-Wert wurde immer auf 0,42 eingestellt. Als Zuschlag wurden ein gebrochener Gipssand von 0-2 bzw. 0-8 mm verwendet. Erwartungsgemäß erwies sich der feinere Sand als reaktiver. Gemessen wurde die Längenänderung über einen möglichst langen Prüfzeitraum [85] in Anlehnung an die Vorschriften zur Längenmessung in DIN 52450 [106].

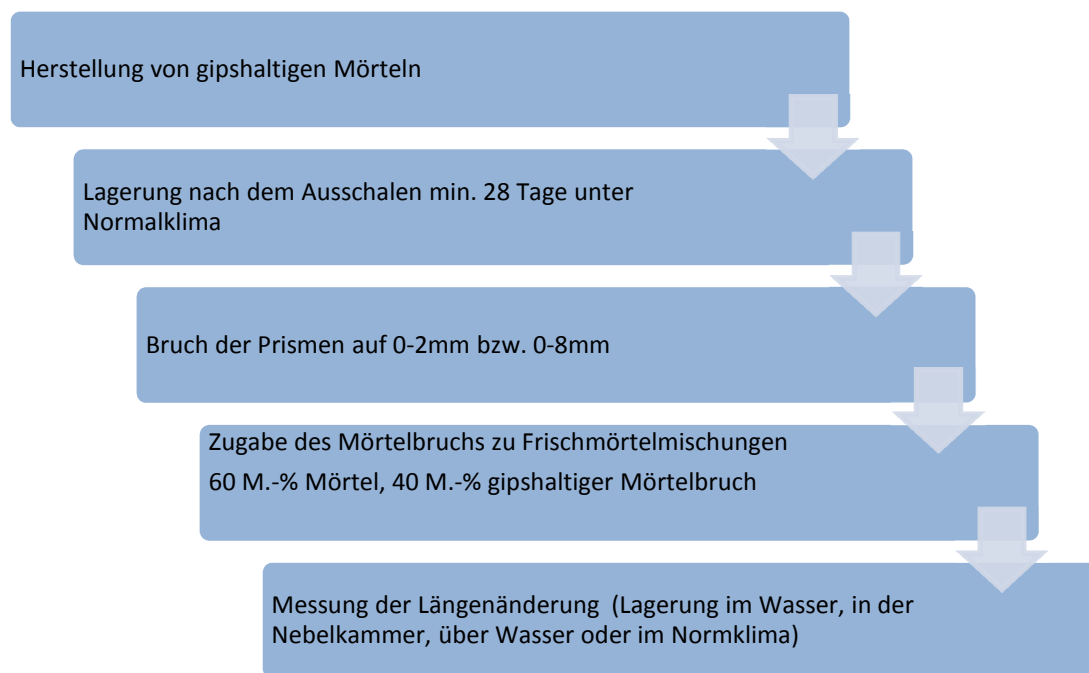


Bild 19 Prüfung der Sulfatbeständigkeit nach Dreuse/ Zier

Direkt nach dem Ausschalen wurden die ersten Messungen durchgeführt (Nullmessung):

- vom 1.-8. Tag wurde täglich gemessen,
- vom 9.-99. Tag wurde im Abstand von 7 Tagen gemessen,
- von 99-180 Tagen wurden alle 14 Tage gemessen,
- nach mehr als 180 Tagen Reaktionszeit wurde die Längenänderung alle 28 Tage gemessen.

Die größte Längenänderung stellte sich bei den Proben ein, die unter Wasser gelagert wurden. Bei Feuchtelagerung (20°C, > 90% rF), Wechsellagerung (zyklisch 2 Tage Wasserlagerung und 5 Tage Normalklima) und Lagerung im Normalklima (20°C, 65% r. F) nahm die Längenänderung kontinuierlich ab.

Für diese Einteilung waren die Proben zwischen 39 und 52 Monaten in der Feuchtelagerung (20°C/>95%rF). Das sind Zeiträume von 3 – 4 Jahren.

Bei manchen Proben konnte bei den Prüfungen in der MFPA Weimar eine Steigerung der Längenänderung erst nach Jahren festgestellt werden. Dies wird damit interpretiert, dass eine leichte Längenänderung zu einer Vorschädigung, wie feinen Rissen führt. Über diese Risse hat Feuchtigkeit besseren Zutritt, Ionenaustausch und somit Mineralneubildung wird dadurch verstärkt.

Bei diesem Test zeigten sich die folgenden Ergebnisse:

- Längenänderung < 2 mm/m: keine sichtbaren Schäden,,
- Längenänderung 2 -10 mm/m: es finden sich Anzeichen erster Schäden
- Längenänderungen > 10 mm/m: es kommt zur Schädigung.

In Anlehnung an die von DREUSE & ZIER [84]vorgestellte Prüfung zur Sulfatbeständigkeit von Mörteln wurde der folgende Test durchgeführt.

4.2 Prüfung der Sulfatbeständigkeit verschiedener handelsüblicher Materialien

4.2.1 Material

Die in Bild 20 aufgeführten handelsübliche Materialien auf unterschiedlicher Bindemittelbasis wurden geprüft:

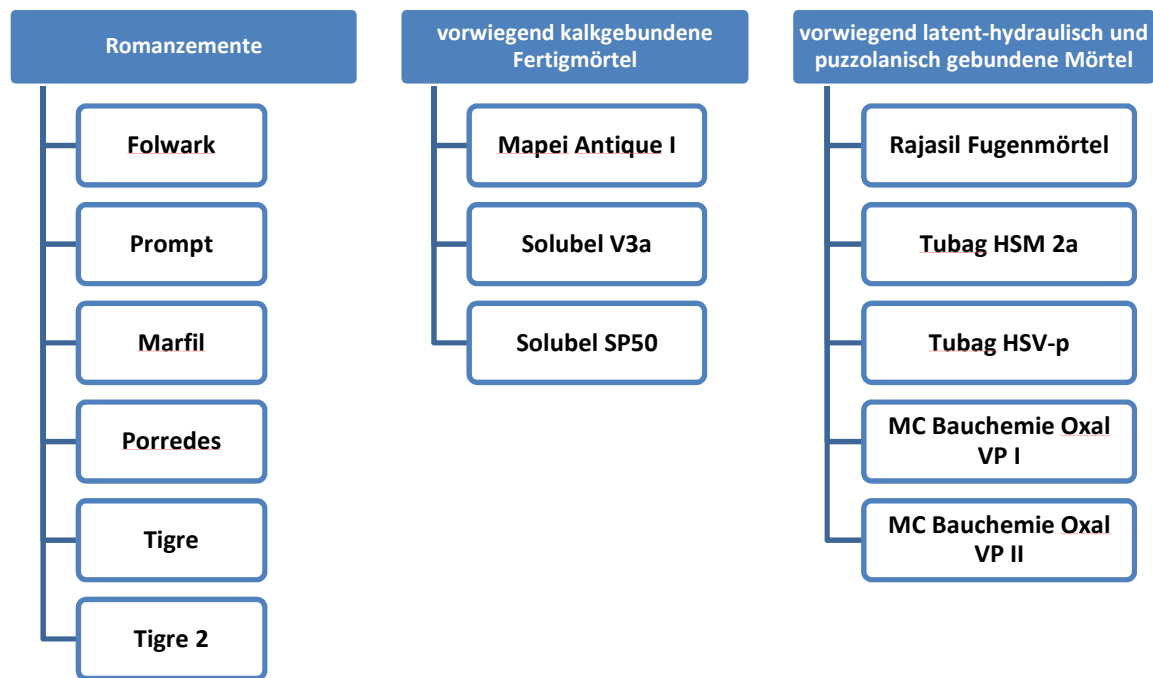


Bild 20 Verwendete Bindemittel und Fertigmörtel

Verwendete Romanzemente

- Folwark, Institute of Ceramica and BuildingsMaterials/ Division of Glass and Building Materials (Polen)
- Prompt Fa. Otterbein (Import aus Frankreich)
- Marfil Fa. Cementoscollet (Spanien)
- Tigre Fa. Cementonaturaltigre (Spanien), 2 Chargen
- Porredes, keine Angaben vorhanden

Vorwiegend kalkgebundene Fertigmörtel

- Mapei Antique I (auf Kalkbasis und „Ecopuzzolan“ (Hüttensand) basierender Injektionsmörtel), Mapei GmbH
- Solubel V3a (Kalkverpressmörtel aus Ca(OH)_2 , Sanden, Ziegelmehl, Feinton, Steinmehl und vergütenden Zusätzen); SOLUBEL Vertriebs GmbH
- Solubel SP50 (Luftkalkmörtel aus Ca(OH)_2 , Sanden, Ziegelmehl, Feinton, Steinmehl und vergütenden Zusätzen) , SOLUBEL Vertriebs GmbH

Der Injektionsmörtel Mapei Antique I wurde aus besonderem Interesse genauer untersucht (Bild 21 und Bild 22). Vom Sack wurde sporadisch eine kleine Menge (ca. 5 ml, ohne Probenteilung) entnommen und davon ein mikroskopisches Streupräparat, abgedeckt mit Deckglas, angefertigt. Die Probe wurde in Immersionsöl ($n=1,52$) eingebettet. Die Probe wurde mit einem Polarisationsmikroskop Leitz Orthoplan Pol untersucht und die Ergebnisse mit einer Kamera Canon EOS 600D dokumentiert. Im Ergebnis konnten drei unterschiedliche Komponenten unterschieden werden:

- Feinstverteilte braune Partikel an der Auflösungsgrenze, die aber oftmals zu größeren Agglomeraten zusammen geballt sind. Die Agglomerate erscheinen sowohl im linear polarisierten, als auch im Licht mit gekreuzten Polarisatoren braun: Calciumhydroxid des Bindemittels
- Splittrig gebrochene, scherbenartige Partikel, die im linear polarisierten Durchlicht farblos erscheinen und bei gekreuzten Polarisatoren isotrop sind. Das Relief ist hoch. Teilweise sind kleine Luftbläschen eingeschlossen. In den Partikeln sind keine Kristalle nachweisbar: Hüttensand
- Gebrochene Partikel die im linear polarisierten Durchlicht farblos erscheinen. Bei gekreuzten Polarisatoren erkennt man deutlich die hohen Interferenzfarben der Karbonate und die für Marmor typischen Zwillingslamellen: Marmormehl

I: isotrope Splitter mit muscheligem Bruch, Größe bis zu 40 μm , meist deutlich kleiner: Hüttensand

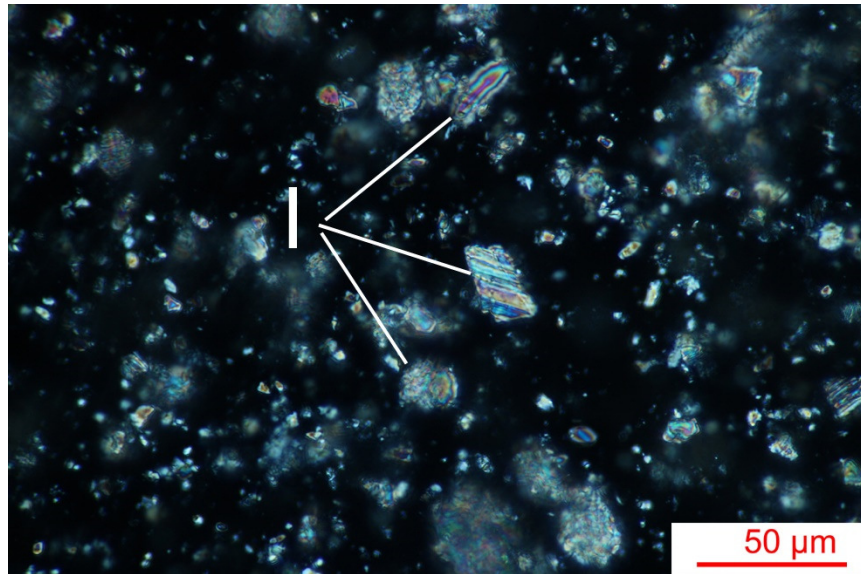
II: Agglomeration feinsten Teile, braun: Kalkiges Bindemittel

Durchlicht, parallele Polarisatoren



Bild 21 *Mapei Antique I; II Licht*

I: hoch lichtbrechende
Partikel,
Zwillingslamellen,
gebrochen, Größe bis
zu 30 µm:
Marmormehl



Durchlicht, gekreuzte
Polarisatoren

Bild 22 *Mapei Antique I; + pol. Licht*

Vorwiegend puzzolanisch gebundene Fertigmörtel

- MC Bauchemie Oxal VP I (Verpressmörtel mit hohem Sulfatwiderstand auf der Basis von Trasskalk, enthält Kalksteinmehl)
- MC Bauchemie Oxal VP II (Verpressmörtel mit hohem Sulfatwiderstand auf der Basis von Trasskalk ohne Kalksteinmehl)

Vorwiegend latent-hydraulisch gebundene Mörtel

- Rajasil Fugenmörtel 02 HS NA DSM SR 9999008 (Fugenmörtel aus HAZ (Sulfathüttenzement) mit Quarzsand)
- Tubag HSV-p (Verpressmörtel für gipshaltiges MW, Bindemittel gemäß Patent 3437680, Zuschläge)
- Tubag HSM 2a (Werksteinmörtel für gipshaltiges MW, Bindemittel gemäß Patent 3437680, Zuschläge)

Wasser

- Leitungswasser Dresden, Räcknitzhöhe

Sulfathaltiger Zuschlag

- Gebrochener Rohgipsstein von Fa. Knauf

Tradical (hochfeines Ca(OH)₂ der Fa. Lhoist)

- Tradical HH 30 mit extrem hoher BET-Oberfläche

CHEMICAL PROPERTIES

Acc. to EN 459-2

CaO + MgO	> 90 %
MgO	< 5 %
CO ₂	< 4 %
SO ₃	< 2 %
CaO (av.)	> 80 %
H ₂ O (free)	< 2 %

PHYSICAL PROPERTIES

PSD by air jet siever	
90 µm	< 7 %
200 µm	< 2 %
BET specific surface area	> 35 m ² /g
Untapped bulk density	0,42 - 0,56 kg/dm ³
Air Content	< 12 %

- Tradical HM 30

CHEMICAL PROPERTIES

Acc. to EN 459-2

CaO (av.)	> 80 %
CaO + MgO	> 90 %
MgO	< 5 %
CO ₂	< 4 %
SO ₃	< 2 %
H ₂ O (free)	< 2 %

PHYSICAL PROPERTIES

According to standardised analytical methods

PSD by air jet sieve	
90 µm	< 7 %
200 µm	< 2 %
BET specific surface area	12 - 18 m ² /g
Untapped bulk density	0,42 - 0,56 kg/dm ³
Iso brightness R457	85 - 90
Air Content	< 12 %

4.2.2 Durchführung

Aus den beschriebenen Bindemitteln bzw. Fertigmörteln wurden Mörtel mit gebrochenem Gipsstein hergestellt. Im Gegensatz zu den erwähnten Tests von [84] wurden vorwiegend kommerziell erhältliche Fertigprodukte verwendet. Dadurch verschiebt sich das Verhältnis von reaktivem Bindemittel zu Gips zugunsten des Anteils von Gips, da in den fertigen Mischungen nicht nur Binder vorliegen, sondern auch Zuschläge, Zusatzstoffe und -Zusatzmittel. Nach den bisherigen Erfahrungen sind die Bindemittelanteile jedoch sehr hoch. Der Mörtel wurde aus diesem Grund ebenfalls im Verhältnis 2:1 mit gebrochenem Gipsstein (< 2 mm) trocken gemischt und anschließend mit Wasser im Verhältnis Wasser/Feststoff von 0,42 angemacht.

Anschließend wurde der Mörtel in Prismenformen mit Messzäpfchen eingebracht und verblieb dort 3 Tage im Feuchtklima (20°C / > 95% r.F.). Danach wurden die Prismen ausgeschalt. An den Messzäpfchen wird die Länge der Prismen mit einem Messgerät nach DIN 52 450 gemessen (Bild 23).

Diese Nullmessung wurde als Referenz für die folgenden Messungen herangezogen. In den ersten sieben Tagen wurde jeden zweiten Tag die mögliche Längenänderung gemessen, danach bis zum 99 Tag alle 7 Tage und bis 180 Tage alle 14 Tage. Nach Ablauf von 180 Tagen wird einmal im Monat Tage die Länge ermittelt. Die Längenänderung in [mm/m] wurde graphisch über der Zeit [d] aufgetragen

Die Prüfprismen verblieben während der gesamten Lagerungsdauer im Feuchtklima welches durch Lagerung der Prismen in Boxen mit Deckel gewährleistet wird (Bild 23). In den Boxen ist ein Gitterboden eingelegt auf dem die Prismen frei liegen. Unter dem Gitterboden befindet sich Wasser, damit sich in der abgeschlossenen Box eine dauerhafte Luftfeuchte von > 95% einstellt. Die Temperatur wird über die Raumtemperatur im Labor geregelt. Das Wasser wird durch Zugabe von Kupfersulfat (CuSO₄ x 5 H₂O als 0,5%ige wässrige Lösung) vor Veralgen geschützt. Nach den Angaben von DREUSE & ZIER [84] ist die Längenänderung für Prüfkörper die vollständig unter Wasser lagern am höchsten. Dennoch wurde darauf verzichtet, da es bei der Unterwasserlagerung auch zu Auslaugungseffekten kommen kann. Außerdem sind Luftkalkmörtel auf CO₂ aus der Luft zur Carbonatisierung angewiesen. Aus diesem Grund wurden die Prüfboxen, in denen die Prismen über Wasser lagern auch bei jedem Prüftermin gelüftet. In einer PVC-Kunststoffbox mit Gitterboden lagern 2 x 3 Prismen, jeweils mit einem Messzäpfchen an den Stirnseiten. Die Box ist mit etwa einem Liter Wasser gefüllt.



Bild 23 Links Messeinrichtung zum Ermitteln der Längenänderung, rechts Kunststoffbox mit Gitterboden für die über Wasserlagerung

Für diese Einteilung waren die Proben bis zum Projektende in der Feuchtelagerung ($20^{\circ}\text{C}/>95\%\text{r.F.}$).

Bei manchen Proben konnte bei den Prüfungen in der MFPA Weimar eine Steigerung der Längenänderung erst nach Jahren festgestellt werden. Dies wird damit interpretiert, dass eine leichte Längenänderung zu einer Vorschädigung, wie feinen Rissen führt. Über diese Risse hat Feuchtigkeit besseren Zutritt, Ionenaustausch und somit Mineralneubildung wird dadurch verstärkt.

Nach Abbruch der Messungen war die röntgenographische Ermittlung des Phasengehaltes geplant. Da die Ergebnisse aber nicht zielführend für das Projekt erschienen wurden keine phasenanalytischen Untersuchungen vorgenommen. Lediglich eine mikroskopische Untersuchung wurde beispielhaft für den Nachweis der Kristallisation und Rissbildung durchgeführt und dokumentiert.

Zur Beurteilung der Qualität der Längenmessung und der dadurch abzuleitenden Schädigung durch den Kontakt von Gips und Bindemittel, wird darauf hingewiesen, dass die Messung der Längenänderung zwar auf eine Schadsalzbildung und damit einhergehende Gefügezerstörung hinweist, dass es aber auch ohne messbare Längenänderung zu Festigkeitsverlusten, beispielsweise durch Mineralumlagerungen und Umkristallisationsprozesse kommen kann. Im WTA Merkblatt [1] wird auf dieses Phänomen ebenfalls hingewiesen, zuzüglich der Bemerkung, dass diese Effekte bisher noch nicht eingehende untersucht sind. Es sind außerdem auch Volumenänderungen denkbar, die nicht unbedingt in einer messbaren Längenänderung resultieren, sondern durch ein „Ausbauchen“ des Prismas

4.3 Ergebnisse der Sulfatbeständigkeitsprüfung

4.3.1 Romanzemente

Romanzemente müssen als Spezialzemente für besondere Aufgaben eingeordnet werden. Sie sind nicht nach DIN EN 197 Teil 1 [80] genormt.

Dagegen sind Normalzemente mit einem hohen Sulfatwiderstand (SR-Zemente) genormt [108]. Diese dienen zum Einsatz bei einem äußeren Sulfatangriff. Es existieren die Klassen CEM I-SR 0 (C_3A -Gehalt des Klinkers nach Bogue berechnet gleich 0%), CEM I-SR 3 (C_3A -

Gehalt des Klinkers nach Bogue berechnet gleich 3%) und CEM I-SR 5 (C_3A -Gehalt des Klinkers nach Bogue berechnet gleich 5%). Die Berechnung nach Bogue schließt das Vorhandensein von C_3A nicht aus, eine einphasenanalytischer Nachweis über den C_3A -Gehalt ist nach oben genannter Norm nicht gefordert.

Daneben werden verschiedene Hochofen- und Puzzolanzemente mit hohem Sulfatwiderstand in dieser Norm definiert.

Entsprechend verschiedener Veröffentlichungen aus dem EU-Projekt rocare enthalten Romanzemente <6% und im Optimum <8% Al_2O_3 im Rohmaterial und zusätzlich noch eine Tonkomponente [82]. Dies würde einem C_3A -Gehalt von 15,9% bzw. über 21,1% + Reste der Tonkomponente entsprechen. Allerdings liegt Aluminium im Romanzement gebunden als C_2AS vor. Auf Grund des hohen Aluminatgehaltes des Romanzementes wurde kein hoher Widerstand gegen einen Inneren Sulfatangriff angenommen. Allerdings können die Werte im Romanzement weit streuen [81], so wurden 5 Romanzemente (von einem 2 Chargen) in die Untersuchungen mit einbezogen. Die folgenden Ergebnisse bestätigen die theoretischen Betrachtungen.

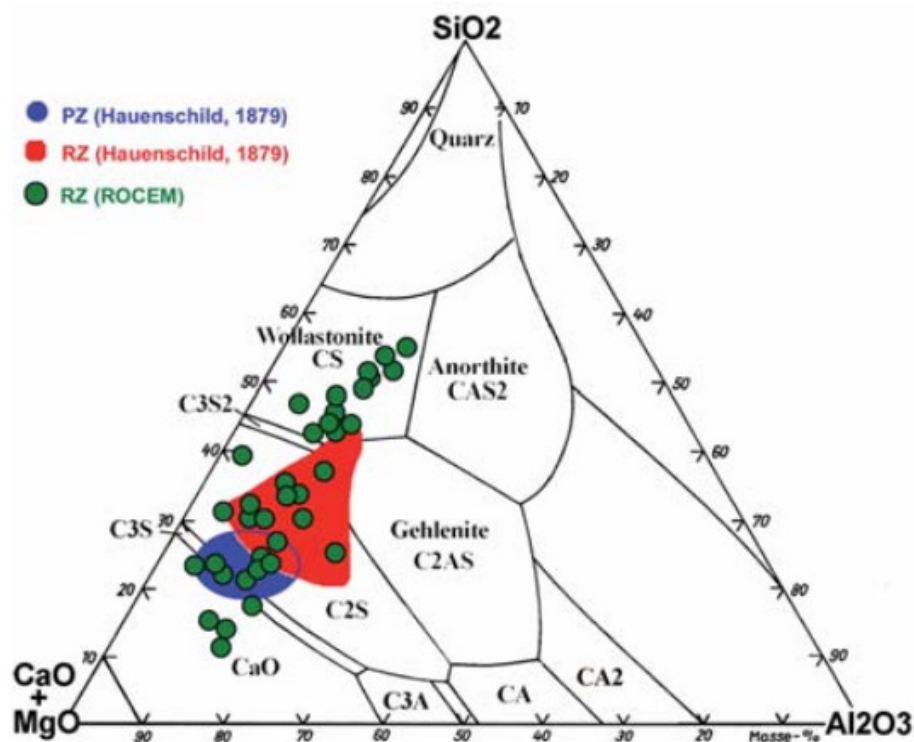


Bild 24 Lage der Romanzemente im Rankindigramm

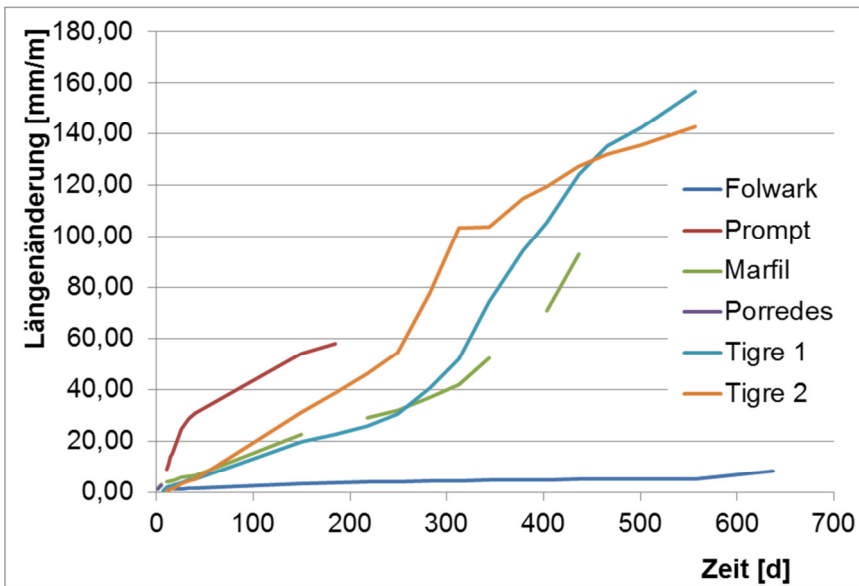


Bild 25 Längenänderungen der untersuchten Romanzemente

Die Längenänderungen während einer Lagerung über Wasser streuen erwartungsgemäß sehr stark. Die geringste Volumenzunahme zeigen die Prismen aus dem Romanzement Folwark. Diese sind aber mit knapp 5 mm/m für eine gezielte Anwendung dieses Bindemittels im sulfatischen System dennoch deutlich zu hoch.

Die mikroskopischen Aufnahmen (Bild 27 bis Bild 30) geschädigter Bereiche zeigen deutlich die Ausbildung von kristallinen Phasenneubildungen in Hohlräumen (Poren, Risse) und auf der Oberfläche.



Bild 26 Fotos untersuchten Romanzemente, links Folwark, rechts Marfil



Bild 27 *Geschädigter Probekörper aus Romanzement Marfil*

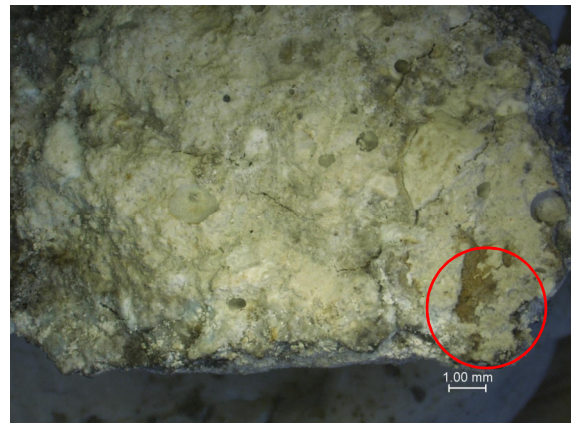


Bild 28 *Geschädigter Probekörper aus Romanzement Marfil, weiße Phasenneubildungen mit offensichtlichem Treibpotential*



Bild 29 *Detailaufnahme aus Bild 28, Neubildungen wachsen in alle Hohlräume*



Bild 30 *Detail aus Bild 28, nadelförmige Kristalle wachsen im gesamten Gefüge*

4.3.2 Vorwiegend kalkgebundene Fertigmörtel

Die vorwiegend kalkgebundenen Mörtel zeigten ebenfalls keinen guten Widerstand gegen inneren Sulfatangriff (Bild 31 und Bild 32). Die geringsten Längenänderungswerte wurden vom V3a erreicht. Allerdings liegen dies nach 645 Tagen bei 4,5 mm/m und sind damit deutlich zu hoch für den angestrebten Anwendungsfall. Die Bilder belegen außerdem eine starke Rissbildung. Besonders der Solubel SP 50 auf Luftkalkbasis zeigte sehr starke Dehnungen. Dies kann auf eine mangelhafte Festigkeitsentwicklung infolge der über Wasserlagerung zurückzuführen sein oder auf eine starke Thaumasitbildung durch die Anwesenheit von Kalksteinmehl, Sulfat und Aluminat (aus geringem PZ-Anteil und Feinton). Da dieser Mörtel ebenfalls nicht für den angestrebten Anwendungsfall einsetzbar ist, wurden keine weiteren Untersuchungen vorgenommen.

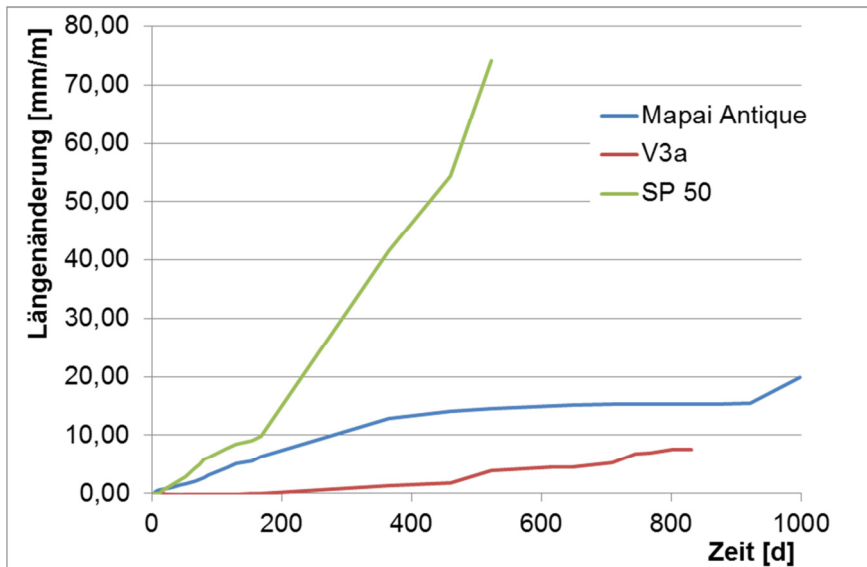


Bild 31 Längenänderungen der untersuchten vorwiegend kalkgebundenen Fertigmörtel



Bild 32 Fotos der untersuchten vorwiegend kalkgebundenen Fertigmörtel, links V3a rechts SP50

4.3.3 Vorwiegend latent-hydraulisch gebundene Mörtel

Die Mörtel mit einem vorwiegend latent hydraulischen Bindemittel zeigten im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen relativ geringe Längenänderungen (Bild 33). Insbesondere die schnelle Zunahme in den ersten Tagen könnte auf eine Feuchtdéhnung zurückzuführen sein. Dies ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht mehr nachvollziehbar, eine derartige Längenänderung wäre aber auch im feuchten Mauerwerk denkbar und wird deshalb in die Betrachtungen mit einbezogen.

Die geringsten Längenänderungswerte wurden vom Rajasil Fugenmörtel auf HAZ-Basis erreicht. Diese liegen nach über 900 Tagen bei unter 0,4 mm/m und zeigen somit ein günstiges Verhalten. Visuell konnten keine Schäden festgestellt werden (Bild 34 und Bild

35). Insgesamt zeigen die vorwiegend latent hydraulisch gebundenen Probekörper die günstigsten Längenänderungseigenschaften unter Sulfatbelastung.

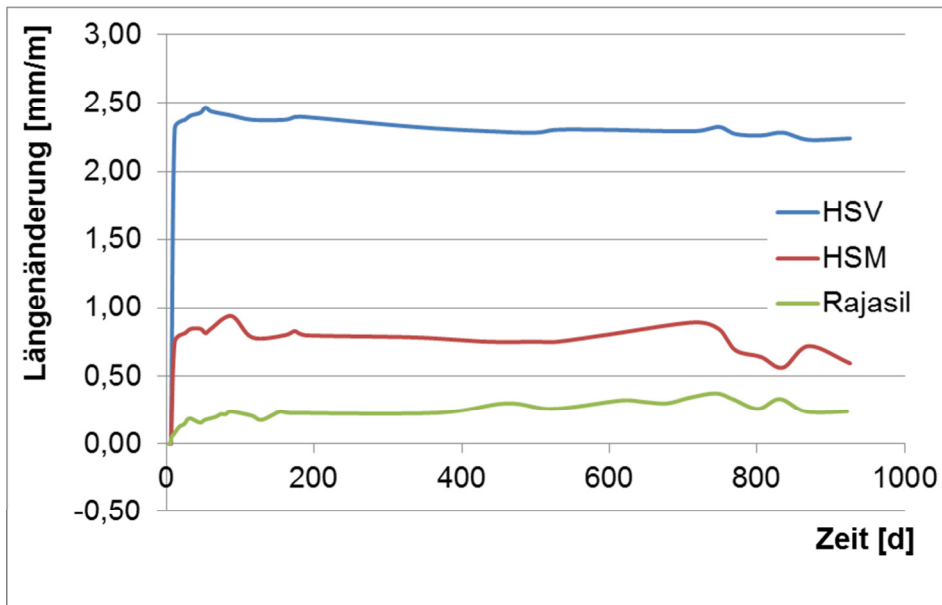


Bild 33 *Längenänderung dreier sulfatbelasteter Fertigprodukte auf vorwiegend latent-hydraulisch gebundener Basis*



Bild 34 *Geschädigte sulfatbelasteten Probekörper, links HSV und rechts HSM 2a*

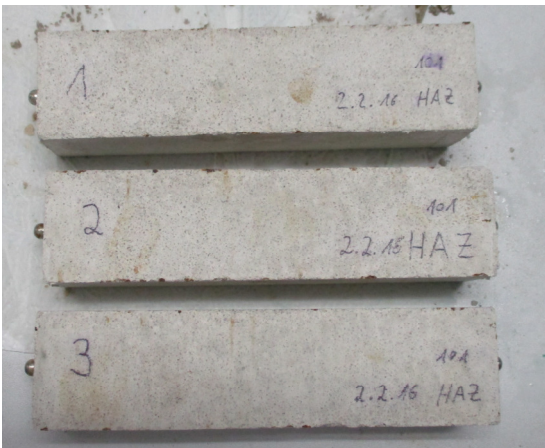


Bild 35 *Sulfat belastete Rajasil-Prismen*

4.3.4 Puzzolanisch gebundene Mörtel

Diese Mörtelgruppe zeigte auf Grund ihrer Zusammensetzung deutliche Unterschiede. Die Probekörper beider untersuchter Mörtel zeigen das erste halbe Jahr einen deutlichen Längenzuwachs. Während sich der von VP II (Mörtel ohne Kalksteinmehl) bei circa 2,5 mm/m einpendelt nimmt der Mörtel mit Kalkanteil weiter an Länge zu (Bild 36). Insgesamt sind die Längenzunahmen beider Mörtel bei den gewählten Prüfbedingungen zu hoch für die angestrebte Anwendung. Augenscheinlich zeigen die Prüfkörper keine Schädigung (Bild 37).

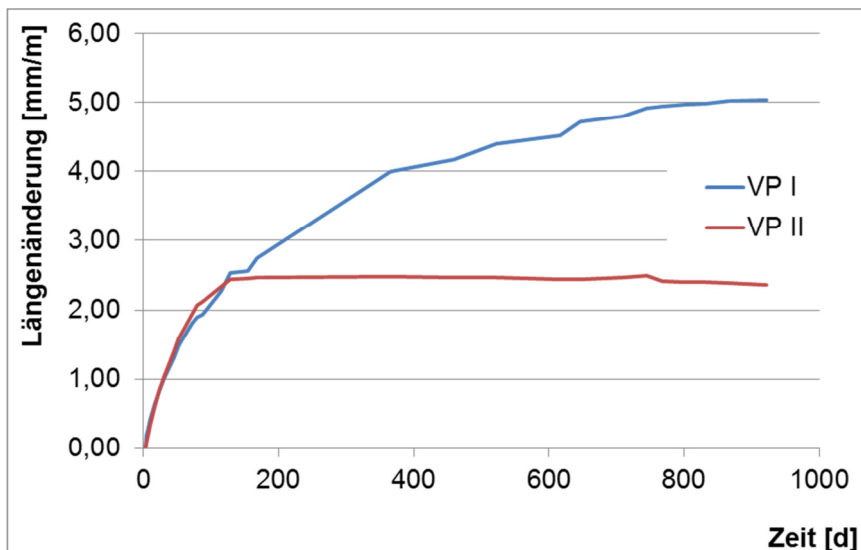


Bild 36 *Längenänderung zweier sulfatbelasteter Fertigprodukte auf vorwiegend puzzolanisch gebundener Basis*

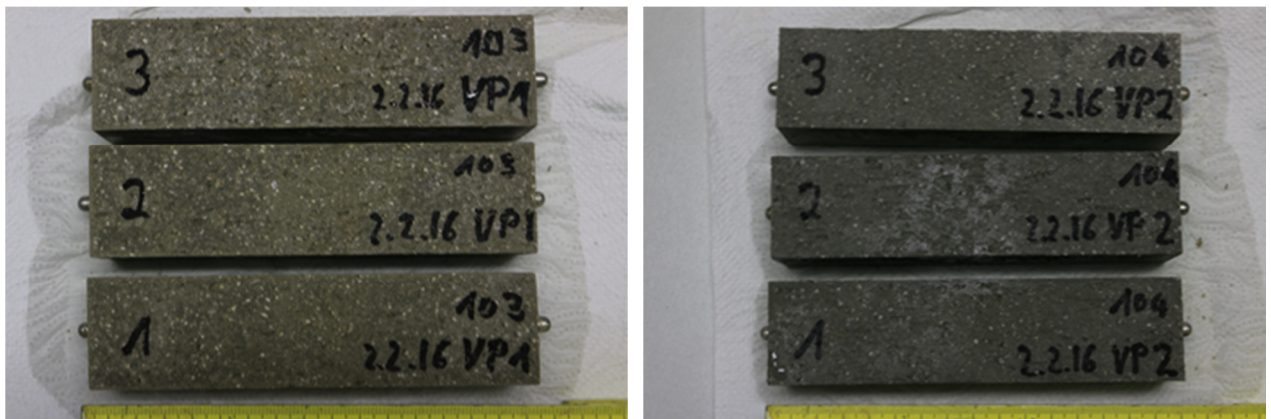


Bild 37 Sulfatbelastete Probekörper, links VP I und rechts VP II

4.4 Zusammenfassung der Sulfatbeständigkeitstests

Die Prüfung Sulfatwiderstandes in Anlehnung an den Test nach Annstett von vier sehr unterschiedlichen Materialgruppen ergab erwartungsgemäß ein sehr differenziertes Ergebnis (Tabelle 3, Bild 38). Wie vielfach beschrieben ist die Lagerungsdauer in einem feuchten Klima entscheidend für die Ausbildung von Schadmineralien. Analog zu [86] wurde der zeitliche Schädigungsverlauf der unterschiedlichen Materialien in verschiedenen Klassen eingeordnet. Dabei wird deutlich dass die meisten Materialien nach längeren Hydratationszeiten noch deutliche Längenänderungen unter den gewählten Prüfbedingungen erfahren. Mit Ausnahme zweier latent-hydraulisch basierter Fertigprodukte weisen alle Materialmischungen Längenänderungen über 2 mm/m auf und sind somit als kritisch beziehungsweise als nicht geeignet für die Anwendung als Injektionsmörtel im sulfathaltigen Mauerwerk zu bewerten.

Insbesondere die romanzementgebundenen Mörtel und die vorwiegend kalkgebundenen Mörtel zeigen keine günstigen Eigenschaften.

Die Produkte HSM 2a und Rajasil Fugenmörtel erfüllen im Prüfzeitraum das Kriterium einer Längenänderung von <2 mm/m.

Tabelle 3: Übersicht zu den Größenordnungen der Längenänderungen in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer in Monaten (RZ-Romanzemente außer Folwark)

Lager- dauer [m]	Längenänderung [mm/m]						
	0-2	2-5	5-10	10-15	15-20	20-25	>25
3	V 3a, Rajasil, HSM, VP I, VP II	Mapei Antique, Folwark, HSV	SP 50	RZ			
6	V 3a, Rajasil, HSM	Folwark, HSV, VP I, VP II		SP 50 Mapei Antique		RZ	
12	V 3a, Rajasil, HSM	Folwark, HSV, VP I, VP II		Mapei Antique			RZ SP 50
18	Rajasil, HSM	V 3a, HSV, VP I, VP II	Folwark		Mapei Antique		
ca. 24	Rajasil, HSM	HSV, VP I, VP II	V 3a, Folwark			Mapei Antique	

Der **Rajasil Fugenstopfmörtel** besitzt ein Größtkorn von 2 mm. Während der Mörtelherstellung zeigte dieser Fertigmörtel eine sehr flüssige Konsistenz. Für einen Injektionsmörtel müsste das Material auf ein Größtkorn von <1 mm abgesiebt werden. Daraus folgend und für die Injektionsfähigkeit kann das Material einen höheren Wasserbedarf als für die Prüfung verwendet aufweisen. Hier wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit bei allen Mischungen mit einem einheitlichen Wasser/Feststoffwert von 0,42 gearbeitet. Mit dem Bindemittel Hochofen-Anhydrit-Zement (HAZ, bestehend aus Hüttensand, Anhydrit und Zement) erfüllt dieses Fertigprodukt zwar nicht den Anspruch völliger Portlandzementklinkerfreiheit, aber ansonsten weitestgehend die Anforderungen des Antrages und könnte für weitere Prüfungen genutzt werden.

Der **HSM 2a von Tubag** basiert auf Bindemittel gemäß Patent PA 3437680 und wird als verträglich mit gipshaltigen Mauerwerk beschrieben. Das Produkt enthält laut technischem Merkblatt hoch sulfatbeständigen Zement. Die Fertigmörtelmischung zeigte bei ihrer Herstellung eine sehr flüssige Konsistenz. Dies ist in dem sehr geringen Wasseranspruch 0,14- 0,17 des Mörtels, welcher eigentlich für Mauer-, Putz- und Fugarbeiten eingestellt ist, begründet. Mit einer Größtkorn von bis zu 4 mm muss das Material für die angestrebte Anwendung ebenfalls auf ein Größtkorn von <1 mm abgesiebt werden. Somit könnte sich auch für diese Mischung der Wasseranspruch noch erhöhen. Mit dem Spezialbindemittel laut Patent erfüllt dieses Fertigprodukt auch nicht den Anspruch völliger Portlandzementklinkerfreiheit, zeigt aber sehr gute Eigenschaften unter den gewählten Prüfbedingungen und könnte für weitere Prüfungen genutzt werden. Auf Grund der sehr

langsamen Festigkeitsentwicklung wurde die Nullmessung erst vier Tage nach der Mörtelherstellung vorgenommen. Die dabei auftretenden Längenänderungen sind entsprechend nicht berücksichtigt und der Nullwert verschiebt sich. Auf jeden Fall sollte vor einer weiteren Anwendung die starke Längenzunahme in den ersten Tagen der Messung (4. Tag Nullmessung; zum 5. Tag deutliche Längenzunahme) geklärt werden. Eventuell ist dies nur auf Feuchteeffekte zurückzuführen.

Bild 38 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse der Prüfung des Sulfatwiderstandes der Mörtel nach rund 2 Jahren Prüfdauer.

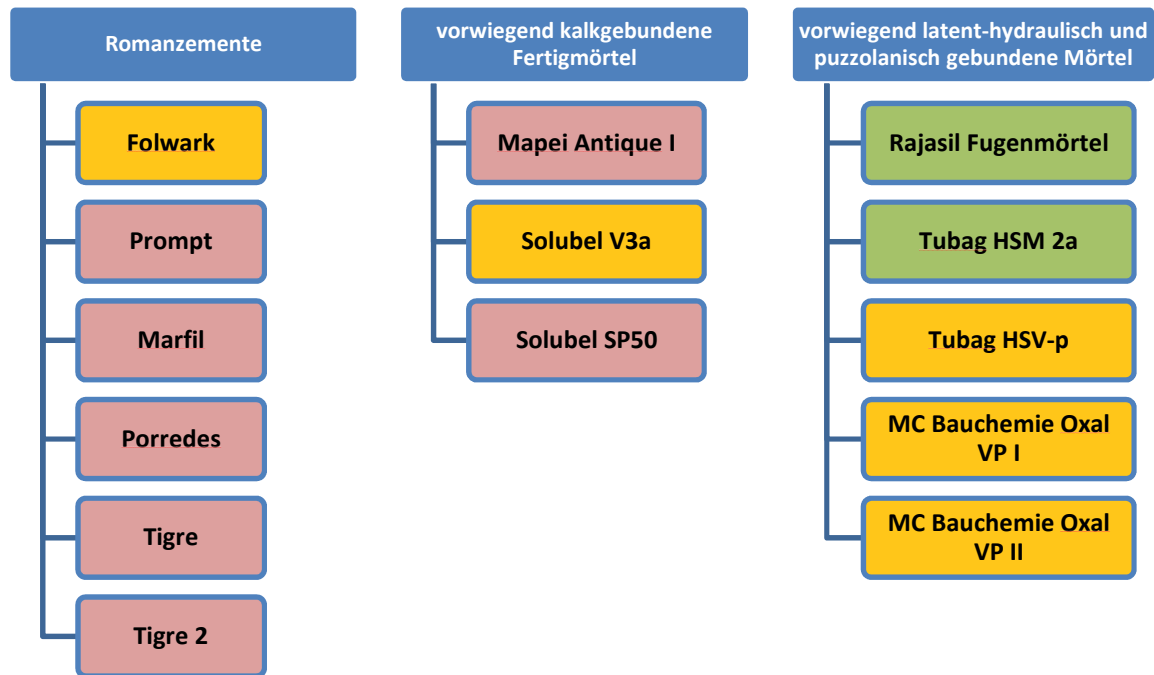


Bild 38 Eignung der verwendete Bindemittel und Fertigmörtel anhand der Längenänderung nach Lagerungszeiten von ca. 2 Jahren (Längenänderung 0-2 mm grün, 2-10 mm gelb, >10 mm rot)

5 Erstellung eines geeigneten Verpressmaterials

5.1 Möglichkeiten zur Erstellung eines sulfatbeständigen Materials

Entsprechend des Projektzieles wurde zunächst ein portlandzementfreies Material für die Herstellung der Injektionsmörtelmischungen gesucht. Auf Grund dieser Anforderung waren die meisten auf dem Markt befindlichen Systeme, auch solche welche für derartiges Mauerwerk angepriesen werden, für das Projekt nicht zielführend einsetzbar (s. Kap. 4.4).

Alternativ zu portlandzementhaltigen Bindemitteln kommen nur folgende Systeme in Frage:

1. Bindemittel auf rein calcitischer Basis
2. Puzzolanische bzw. latent hydraulische Bindemittel ohne Anregung durch Portlandzement
3. Bindemittel auf Caliumsulfatbasis (Gips, Halbhydrat, Anhydrit)

Für das erste System wurden Untersuchungen in geringem Umfang vorgenommen. Materialkombinationen im zweiten und dritten System wurden ausführlich untersucht (siehe folgende Kapitel).

5.1.1 Bindemittel auf der Basis von Kalk

Luftkalk (CaO oder gelöscht Ca(OH)_2) erhärtet durch die Aufnahme von CO_2 aus der Umgebungsluft. Im Mauerwerk besteht keine ungehinderte Luft- und damit CO_2 -Zufuhr. Somit besteht für ein rein carbonatisch erhärtendes Injektionsmörtelsystem keine Möglichkeit zur Erhärtung.

Hydraulische Kalke enthalten die Klinkerphasen C_2S (Dicalciumsilicat) und C_3A (Tricalciumaluminat). Das C_3A im hydraulischen Kalk ist analog zum C_3A im Portlandzementklinker in der Lage mit Calciumsulfat und Wasser Ettringit zu bilden und somit zu Treiberscheinungen zu führen. Eine Anwendung von hydraulischen Kalken in diesem Projekt ist deshalb nicht zielführend (s. auch Kap. 4.3.1.).

Versuche zur Verdünnung eines Fertigmörtels mit Kalk als Füllstoff

Parallel zu den vorangegangenen Untersuchungen wurde versucht, die Volumenzunahmen durch einen Ersatz der puzzolanischen beziehungsweise teilweise latent hydraulischen Bestandteile zu senken. Dafür wurden die latent hydraulischen und puzzolanischen Bestandteile des Fertigmörtels von MC Bauchemie Oxal VP I durch Tradical HH und Tradical HM ersetzt. Diesen Mischungen wurde kein Sulfat zugegeben. Es wurde lediglich die Längenänderung dieser Mörtel unter Feuchtebelastung (Lagerung über Wasser) untersucht.

Mischungen:

HH 301 Ersatz des Trassmehls durch Tradical HH 30

HH 302 Ersatz des Trassmehls und der Flugasche durch Tradical HH 30

HM 301 Ersatz des Trassmehls durch Tradical HM 30

HM 302 Ersatz des Trassmehls und der Flugasche durch Tradical HM 30

Bild 39 zeigt die Ergebnisse der Messung der Längenänderungsmessungen ohne Sulfatbelastung.

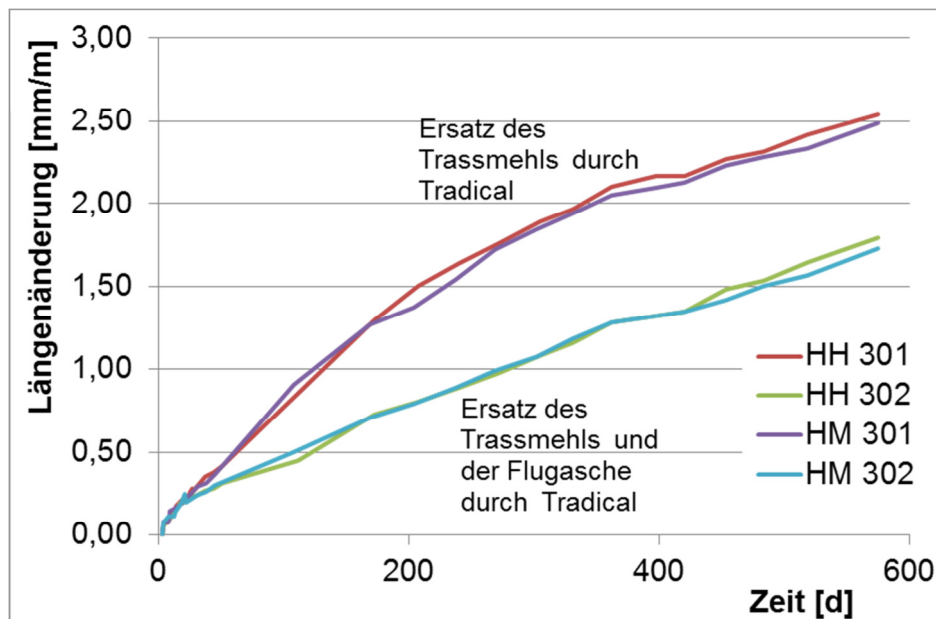


Bild 39 *Längenänderung Fertigprodukte auf vorwiegend puzzolanisch gebundener Basis*

Die Längenänderungen dieser Mischungen lagen bereits ohne Sulfatbelastung nach 180 Tagen Reaktionszeit bei über 1 mm/m.

Dieser Ansatz wurde auf Grund der oben genannten theoretischen Gründe und des Vorhandenseins von Portlandzement im Fertigmörtel nicht weiter verfolgt.

5.1.2 Latent hydraulische beziehungsweise puzzolanische Bindemittel

Latent hydraulische Materialien (zum Beispiel Hüttensand, siehe auch Bild 40) müssen für eine Hydratationsreaktion angeregt werden. Dies erfolgt in der Regel mit Portlandzementklinker. Eine Anregung mit Alkalien ist ebenfalls möglich, führt aber oft zu Ausblühungen (Na- oder Kaliumsulfat) und zu erheblichen Anforderungen beim Arbeitsschutz. Eine Anregung mit erdalkalischen Stoffen kann unter Umständen erfolgen, dafür ist aber eine technisch sehr aufwendige Feinmahlung des Hüttensandes notwendig (BET-Oberfläche ca. 30.000 cm²/g). Diese ist nicht Gegenstand des Projektes.

Eine sulfatische Anregung wird in Hochofen-Anhydrit-Zementen genutzt, muss aber durch eine geringe Portlandzementzugabe unterstützt werden. Materialien, welche mit diesem Bindemittel gebunden wurden, weisen im Allgemeinen einen hohen Sulfatwiderstand auf (siehe auch Kap. 4.3.3).

Puzzolanische Stoffe benötigen für ihre Reaktion eine Anregung und CaO bzw. Ca(OH)₂ für die Verfestigungsreaktion. Die Bereitstellung desselben erfolgt in der Regel ebenfalls durch die Zugabe von Portlandzementklinker. Eine Anregung derselben mit hochfeinem und daher reaktionsfähigem Ca(OH)₂ erschien den Bearbeitern des Projektes denkbar. Infolgedessen wurden verschiedene Mischungen angesetzt und die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 6 Monaten betrachtet.

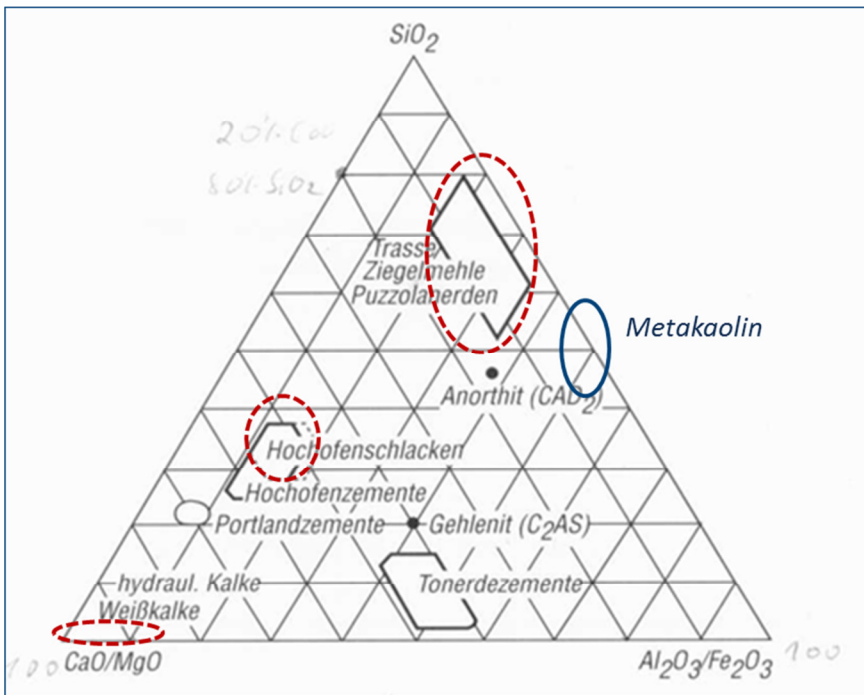


Bild 40 Rankin Diagramm mit möglichen latent-hydraulischen und puzzolanischen Bindemitteln

Fünfzehn Mischungen aus folgenden Materialien wurden untersucht:

- Bayrischen Trass,
- Rheinischen Trass,
- Metakaolin bzw.
- hochfeines Ca(OH)_2 zur Anregung (Lhoist; Tradical HH, BET-Oberfläche $> 35.000 \text{ cm}^2/\text{g}$).

Weiterhin wurde versucht die Hydratationsreaktion der Mischungen mit einem Keimbildner zu beschleunigen (BASF; X-Seed). Nach einer Hydratationszeit von 6 Monaten war keine ausreichende Festigkeitsentwicklung der untersuchten 15 Mischungen nachweisbar (Tabelle 4). Infolgedessen wurde von diesen Materialien abgesehen und an einem Bindemittel auf Calciumsulfatbasis gearbeitet.

Tabelle 4: Bindemittelmischungen aus puzzolanischen Materialien und Tradical HH 30

Nr.	Bezeichnung	Mischung	Puzzolan (P) [M.-%]	Centrilit (C) [M.-%]	Tradical (CH) [M.-%]	Zusatzmittel [M.-%]	Verhältnis P+C / CH
Bayrischer Trass							
1	M1	Trass+ Ca(OH) ₂	95,00		5,00		19,0
2	M2	Trass+ Ca(OH) ₂	92,50		7,50		12,3
3	M3	Trass+ Ca(OH) ₂	90,00		10,00		9,0
4	M4	Trass+ Ca(OH) ₂	75,00		25,00		3,0
5	MC1	Trass+Centrilit +Ca(OH) ₂	72,50	2,50	25,00		3
6	MC2	Trass+Centrilit +Ca(OH) ₂	70,00	5,00	25,00		3
7	MC3	Trass+Centrilit +Ca(OH) ₂	65,00	10,00	25,00		3
8	C	Centrilit+ Ca(OH) ₂	0,00	75,00	25,00		3
Rheinischer Trass							
9	M4-W	Trass+ Ca(OH) ₂	75,00	0,00	25,00		3,0
10	M5	Trass+ Ca(OH) ₂	60,00	0,00	40,00		1,5
11	M6	Trass+ Ca(OH) ₂	50,00	0,00	50,00		1,0
12	M7	Trass+ Ca(OH) ₂	75,00	0,00	25,00	3,50 X-Seed	3,0
13	MC1-W	Trass+Centrilit +Ca(OH) ₂	72,50	2,50	25,00		3,0
14	MC4	Trass+Centrilit +Ca(OH) ₂	72,50	2,50	25,00	3,50 X-Seed	3,0
15	MC3	Trass+Centrilit +Ca(OH) ₂	65,00	10,00	25,00		3

5.1.3 Bindemittel auf Caliumsulfatbasis (Gips, Halbhydrat, Anhydrit)

Im Projektantrag ist die Entwicklung eines portlandzementfreien Systems auf Kalkbasis beschrieben. Auf Grund der vorgenannten Ergebnisse war die einzig mögliche Lösung die Entwicklung eines Gips- oder eines Gips-Kalk-Systems.

Der **Vorteil** dieser Entwicklung ist, dass die Sulfatbeständigkeit nicht extra geprüft werden musste, da im sulfatischen System geblieben gearbeitet wurde.

Ernstzunehmende **Nachteile** sind die feuchteabhängige Festigkeit sulfatischer Systeme und die zu erwartende Verringerung der Festigkeit bei Kalkzugabe, da wie bereits beschrieben im Mauerwerk eine carbonatische Verfestigung nur untergeordnet bis gar nicht möglich ist.

Im Folgenden wird die Entwicklung eines Injektionsmörtels und eines Injektionsschaummörtels auf Calciumsulfatbasis beschrieben.

5.2 Erstellung eines neuen Materials auf Calciumsulfatbasis

Mörtelinjektionen werden auf Grund ihrer spezifischen technologischen Anforderungen (Pumpbarkeit, Fließfähigkeit im Mauerwerk) mit einem höheren Wasser-Bindemittelwert als Mauermörtel hergestellt. Dem kann mit Fließmitteln und Luftporenbildnern in gewissen Grenzen entgegengewirkt werden. Außerdem wird in der Regel ein hohes Wasserrückhaltevermögen derartiger Mörtel angestrebt. Trotzdem wird zunächst eine zusätzliche Wassermenge in das oft ohnehin schon feuchte Mauerwerk eingebracht. Das für die chemische Reaktion nicht notwendige Wasser muss dann im Mauerwerk austrocknen. Die Austrocknungszeiträume sind von den vorhandenen Bedingungen des Mauerwerks abhängig (Feuchtegehalt vor der Sanierung, konstruktiven Bedingungen wie Mauerwerksdicke, Umgebungsbedingungen, Material). Twelmeier [26] berechnete für die Austrocknungszeit eines optimierten Gipsmörtels bei einer Umgebungsfeuchte von 95% Zeiträume um die 60 Tage. Bei einer Umgebungsfeuchte von 65 % relativer Feuchte erfolgte eine Austrocknung von Zylindern deutlich früher.

Für Gipsbinder sind die Prüfbedingungen nach Norm im folgenden Kapitel angegeben.

5.2.1 Prüfbedingungen

Die Bestimmung der Festigkeit für Gipsbinder erfolgt nach EN 13279-2 [87]. Darin heißt es: die Prismen sind nach dem Erreichen einer angemessenen Festigkeit entformen, dann 7d bei 23°C und 50% rel. Feuchte lagern und dann einer Trocknung bei 40°C bis zur Massekonstanz zu unterziehen. Anschließend können die Härte und verschiedene Festigkeiten geprüft werden. Dieses Prüfregime bildet die Bedingungen eines historischen sulfathaltigen Mauerwerks in Mitteleuropa in der Regel nicht ab. In anderen Klimazonen können derartige Prüfbedingungen jedoch durchaus gerechtfertigt sein. Wie vor beschrieben benötigt das Injektionsmaterial im Inneren des Mauerwerks oft lange Austrocknungszeiträume. Die alleinige Angabe von Normwerten scheint daher irrelevant. Im Verlauf der Projektbearbeitung wurde das im Bild 41 Lagerungsregime entwickelt.

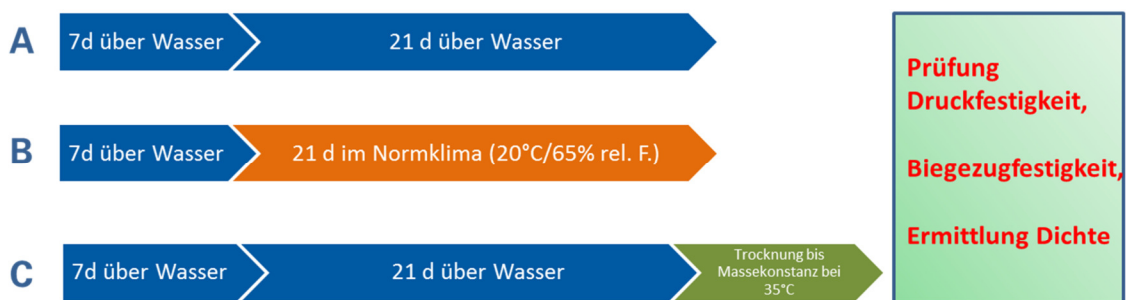


Bild 41 :Vorgeschlagene Lagerungsbedingungen für sulfathaltige Injektionsmörtel

- Lagerung A soll ein vollständig feuchtes Mauerwerk nachahmen beziehungsweise ein Mauerwerk welches kaum Austrocknung zulässt
- Lagerung B soll ein Mauerwerk mit Austrocknungspotential und sehr trockenes Mauerwerk simulieren
- Lagerung C soll den Fall der Lagerung A darstellen und durch die anschließende Trocknung in Anlehnung an die Norm einen Vergleich zu anderen Produkten ermöglichen.

5.2.2 Verfügbare Bindemittel im Calciumsulfatsystem

Die Erstarrung aller Gipsbindemittel erfolgt durch die Wasseraufnahme (Einbindung der Wassermoleküle in das Kristallgitter) wasserfreier bzw. wasserarmer Calciumsulfatphasen (siehe auch Bild 42). Diese Hydratationsreaktion von Halbhydrat und Anhydrit II ist eine Fällungsreaktion. Nach der Wasserzugabe zum trockenen Bindemittel dissoziieren diese Phasen entsprechend ihrer spezifischen Löslichkeit in Wasser. Verursacht durch die unterschiedlichen Löslichkeiten von Anhydrit, Halbhydrat und Dihydrat entsteht eine an Dihydrat übersättigte Lösung, aus welcher das Dihydrat ausfällt. Moderne Halbhydratbindemittel werden für den jeweiligen Anwendungszweck modifiziert und Erstarren innerhalb von einigen Minuten bis zu wenigen Stunden.

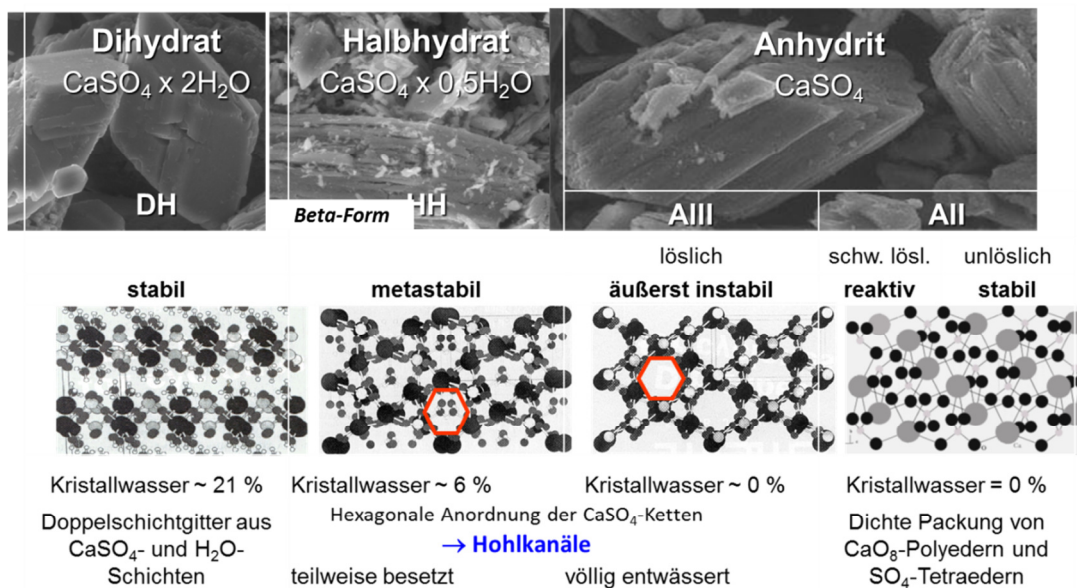


Bild 42 Calciumsulfatphasen mit unterschiedlichem Wassergehalt aus [88]

Halbhydrat wird in zwei Varietäten hergestellt:

Das günstigste Massenprodukt **Stuckgips** beinhaltet **β-Halbhydrat**. Dieser Gips ist preiswert und zeichnet sich durch eine sehr schnelle Reaktion, aufgrund zerklüfteter Teilchen aus ehemaligen Dihydratkörnern, aus. Das Hydratationsprodukt weist eine geringe Festigkeit auf und ist wasserunbeständig.

Der deutlich preisintensivere **Autoklavgips (α-Halbhydrat)** bildet wesentlich höhere Festigkeiten und zeichnet sich durch eine deutlich bessere Wasserbeständigkeit aus.

Die Unterschiede der beiden Halbhydratvarietäten sind aus Tabelle 5 ersichtlich.

Tabelle 5: Unterschiede zwischen Beta- und Alphahalbhydrat in Anlehnung an [88] und [89]

Betahalbhydrat	Alphahalbhydrat
<i>Herstellung</i>	
Entwässerung von Dihydrat ab ca. 35°C, im technischen Prozess trocken bis ca. 180°C, dabei entsteht auch Anhydrit III	Entwässerung von Dihydrat ab ca. 97°C im technischen Prozess nass im Autoklaven, dabei kann auch α -Anhydrit III entstehen
<i>Oberfläche</i>	
Größere Oberfläche durch kleinere zerklüftete Teilchen	
<i>Relevante Unterschiede im Kristall</i>	
Kleine Kristalle mit starken Gitterstörungen bewirken eine hohe Oberflächenaktivität, Zusammenballung kryptokristalliner Einzelteile	Große, gut ausgebildete, ideomorphe, hexagonale oder pseudohexagonale, kompakte Kristalle
<i>Hydratationswärme</i>	
111 J/g bis 134 J/g	100 J/g bzw. 118 J/g
<i>Einstreumenge</i>	
130 bis 170 g/ 100ml H ₂ O	230 bis 260 g/ 100ml H ₂ O
<i>Festigkeit</i>	
Druckfestigkeit bis 14 N/mm ² Biegezugfestigkeit bis 5 N/mm ²	Druckfestigkeit bis 40 N/mm ² Biegezugfestigkeit bis 12 N/mm ²
<i>Kristallwasser</i>	
4,1 M.-% Drehofen 5,6 M.-% Großkocher	6,2 M.-% Autoklav

Rostbandgips (Mehrphasengips, Putzgips) ist ein Hochbrandgips, der in Korngruppen von 5 bis 60 mm trocken bei Temperaturen von 300°C bis 700°C gebrannt wird. Infolgedessen entsteht ein Phasengemisch zwischen Halbhydrat und Anhydrit. Der Kristallwassergehalt beträgt ca. 0,8 M.-%. Die erreichbare Druckfestigkeit liegt bei ca. 15 N/mm² und die Biegezugfestigkeit bis 5 N/mm². Die dafür erforderliche Einstreumenge liegt bei ca. 167 g/100ml H₂O. Der Phasenanteil kann schwanken, entsprechend schwanken dann die Eigenschaften des Brennproduktes.

Hochbrandgips nach historischem Vorbild ist ein Mehrphasengips, mit einem hohen Anhydritanteil. Er muss angeregt werden. Dieser Sondergips wird derzeit in Deutschland nur von zwei Firmen hergestellt und als modifiziertes Fertigprodukt vertrieben.

Die Hundisburger Baustoffmanufaktur bietet als einziger Hersteller in Deutschland vier Hochbrandgipse an, die in einem thermischen Prozess nach historischem Vorbild gebrannt werden. Als Rohstoffe dienen zwei Zechsteingipse, ein Keupergips und ein Alabastergips

aus Volterra (für „Marbel-Cement“). Der Brand erfolgt bei ca. 900°C. Nach dem Abkühlen wird das Material zerkleinert - bis zu 500 µm fein beim „Marbel-Cement“.

CASEA stellt gut formulierte Hochbrandgipse im technischen Prozess her.

Der relativ hohe Anhydritanteil bei Hochbrandgipsen kann bei Hydratation zu Problemen infolge Dehnung führen. Im Vergleich zu anderen Calciumsulfatbindern läuft die Reaktion sehr langsam ab.

Folgende **technologische Einflüsse auf die Hydratation** bzw. Erstarrung von Gipsbindern müssen für die Entwicklung eines Injektionsmörtels beachtet werden:

- Mit zunehmendem Anteil von Anhydrit II nimmt die Aktivität des Branntgipses ab, die Erhärtungszeit sowie die Zeit zwischen Erhärtungsbeginn und -ende nehmen zu.
- Ein steigender Anteil von Anhydrit III und Dihydrat in der Bindemittelmischung beschleunigt die Hydratation.
- Mit steigender Mahlfeinheit nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit zu.
- Mit steigenden Anmachwassertemperaturen bis 30 °C wird die Hydratation beschleunigt, bei Anmachwassertemperaturen über 30 °C wird die Reaktion verzögert.
- Mit einem zunehmenden Wasser-Bindemittel-Verhältnis wird die Reaktion ebenfalls verzögert.
- Eine steigende Sumpfdauer verzögert die Abbindereaktion.
- Zunehmende Rührdauern bzw. Rührintensitäten bewirken eine Beschleunigung der Hydratation.
- Zusatzmittel können je nach Art eine beschleunigende oder eine verzögernde Wirkung haben.
- Materialreste (DH) an den Arbeitsgeräten können eine deutliche Beschleunigung der Abbindereaktion bewirken.

5.2.3 Eingesetzte Materialien und Mischregime

Die in Tabelle 6 aufgeführten Materialien wurden für die Mörtelformulierung genutzt:

Tabelle 6: verwendete Materialien

Bindemittel / Fertigmörtel	Verzögerer	Fließmittel	Schaum- bildner	Stabilisierer
CASEA casusan HGE (Trockenmörtel, Ellrich)	Sika Retardan 2025 P	BASF Melflux 6681F	Aluminium- pulver RO 260	DOW Walocel MT 400 PFV
Knauf Beta-Halbhydrat (Iphofen)	Sika Retardan 200P	BASF Melflux PP100F	Aluminium- pulver RO 560	
Knauf Alpha-Halbhydrat (Markteinersheim)	Seignettesalz	Sika ViscoCrete 510	Innotec K1/K3	
Knauf Rostbandgips (Neuherberg)			MC Oxal PLB 6	
Knauf Hochbrandgips (Rottleberode)			MC Centripor SK 155	
Manufaktur Ziegelei Hundisburg HBG-Keuper			MC Centripor SK 120	
Lhoist Tradical HH				
Lhoist Tradical HM (Oxal VP II T) ²				
Hochbrandgips im historischen Ofen im gebrannt (HBG A) ³				

Für die Wasserzugaben wurde entionisiertes Wasser genutzt.

Mischregime für die Gipsmörtel:

- Einstreuen des Gipsmörtels in das Anmachwasser im Mischer 30s
- 30s Ruhe
- 60s Mischung.

Nach dem Mischen wurden die Frischmörtel sofort in Prismenformen gefüllt und mindestens 24 Stunden im Feuchtekasten über Wasser gelagert. Wurde nach dieser Zeit eine ausreichende Festigkeit erreicht könnten die Prismen entformt und umgelagert werden.

5.2.4 Technologische Ziele für einen Injektionsmörtel

Für das Injektionsmaterial wurden folgende Zielvorgaben gesteckt:

- Fließmaß ca. 260 mm
- Verarbeitungszeit min. 60 min
- Gute Trockenfestigkeiten und akzeptable Nassfestigkeiten
- Möglichst schäumbar
- bezahlbar

² Fertigmörtel auf Trassbasis verwendet zum Vergleich der Schaumbildung mit verschiedenen Produkten

³ Dieser Hochbrandgips wurde lediglich für Vergleichszwecke verwendet. Er wurde im historischen Ofen im Iran gebrannt, händisch zerkleinert und nach Deutschland transportiert.

Zunächst wurden mit dem CASEA Hochbrandgips Versuche durchgeführt um entsprechend günstige Bedingungen einzustellen.

5.2.5 Arbeiten mit CASEA-Hochbrandgips

Es wurde mit dem Fertigprodukt casusan HGE – Historischer Gipsestrich gearbeitet. Für eine pumpfähige Verarbeitung wurden Mischungen mit einem Wasser/Fertigmörtelwert von 0,2 angefertigt. Da dieser Mörtel eine Anhydritkörnung von 0 bis 2 mm enthält, wurde für eine Mischung das Fertigprodukt auf <1 mm abgesiebt (HGE A). Die Festigkeiten dieses Mörtels sind im technischen Merkblatt mit ≥ 30 N/mm (Druckfestigkeit) und $\geq 6,0$ N/mm (Biegezugfestigkeit) angegeben. Abweichend von der Norm wurden diese Mörtel nach einer 28tägigen Lagerung über Wasser nass geprüft (Bild 43). Die Festmörtelrohichte betrug für beide Mischungen im entsprechenden Feuchtzustand $2,3 \text{ g/cm}^3$. Für einen nassen Gipsmörtel werden die Festigkeitswerte sehr positiv bewertet.

Weiter wurden die Längen- und Masseänderungen dieser Mörtel über die Zeit bei einer Lagerung über Wasser betrachtet (Bild 44 und Bild 45). Auffällig ist ein deutlicher Längenzuwachs zwischen 64 und 148 Tagen Lagerungsdauer. Zu welchem Zeitpunkt genau der deutlich Zuwachs begonnen hat kann nicht gesagt werden, da der Messabstand relativ groß war. Da im gesamten Messzeitraum auch ein Massezuwachs nachgewiesen werden konnte, ist davon auszugehen, dass im Material Reaktionen mit einer Wasserbindung ablaufen, die eine Längenänderung hervorrufen. Wahrscheinlich ist eine langsam ablaufende Hydratation des Anhydrits.

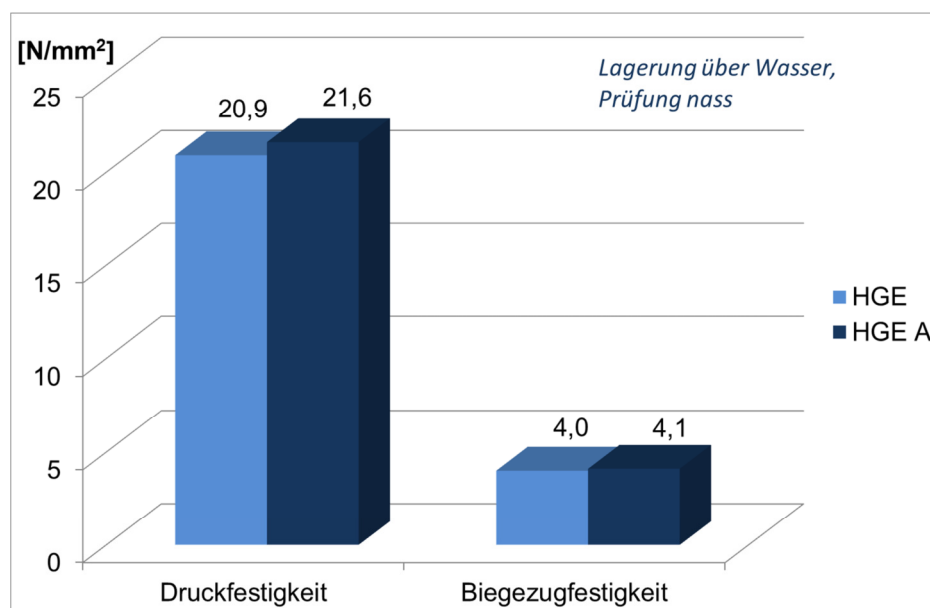


Bild 43 28-Tage-Festigkeiten von CASEA-HGE-Mörtelmischungen (HGE A Größtkorn <1 mm)

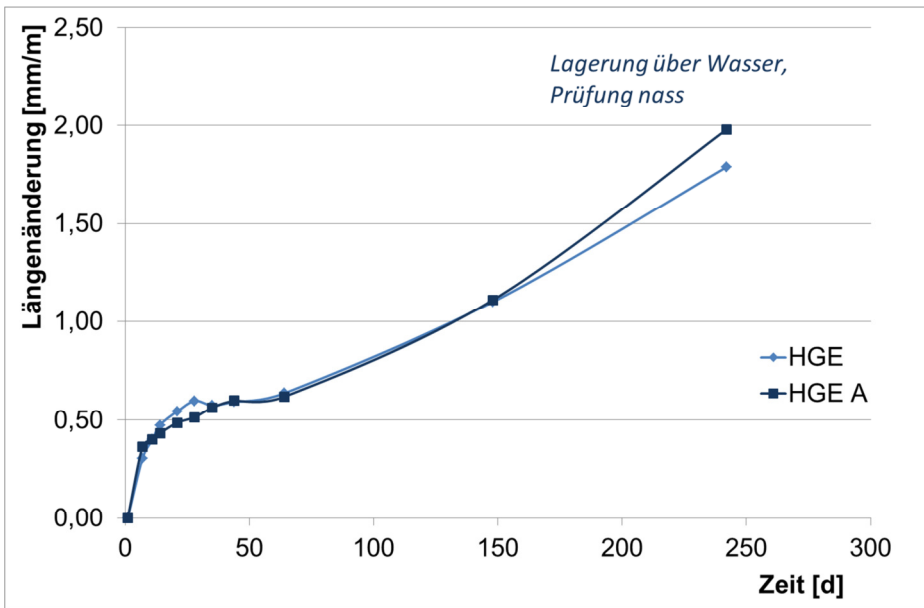


Bild 44 Längenänderungen der CASEA-HGE-Mörtelmischungen (HGE A Größtkorn <1 mm)

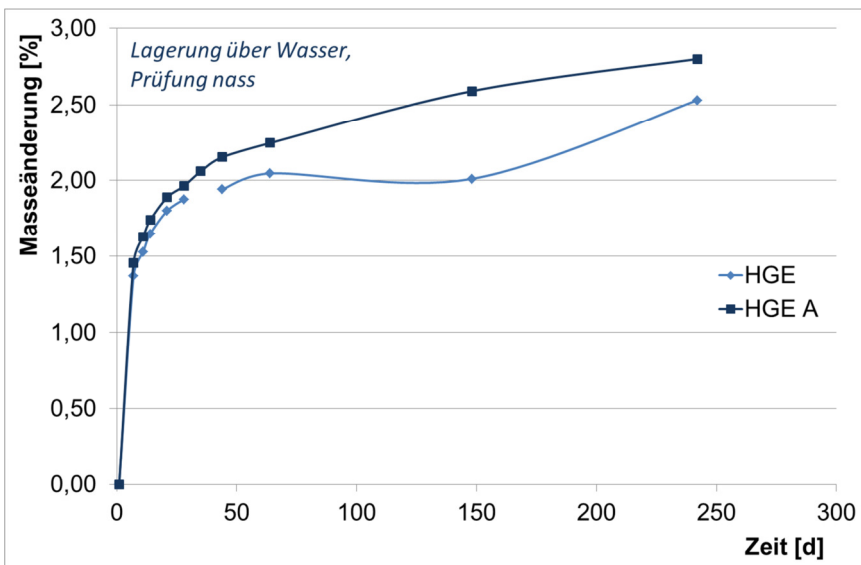


Bild 45 Masseänderungen der CSEA-HGE-Mörtelmischungen (HGE A Größtkorn <1 mm)

Im Weiteren wurde der HGE-Mörtel <1 mm mit Gipsgesteinsbruch 0-8 mm für eine Verträglichkeitsprüfung in Anlehnung nach Anstett angesetzt. Das Mischungsverhältnis Fertigmörtel : Gipsstein betrug 1 : 1. Die Lagerung erfolgte über Wasser. Es wurden zwei unterschiedliche Wasser-Fertigmörtel-Verhältnisse genutzt:

HGE+G1 0,40 (Sedimentationserscheinungen)

HGE+G2 0,22 (stabiler Frischmörtel).

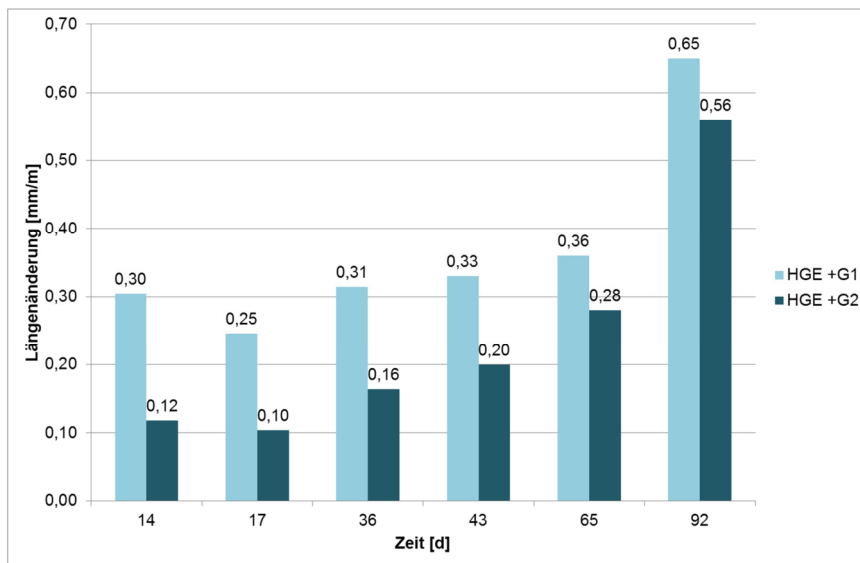


Bild 46 *Längenänderung des HGE<1 mm mit Gipsgesteinsbruch 0-8 mm mit unterschiedlichen Wasser-Fertigmörtel-Verhältnissen (HGE+G1 0,40 und HGE+G2 0,22)*

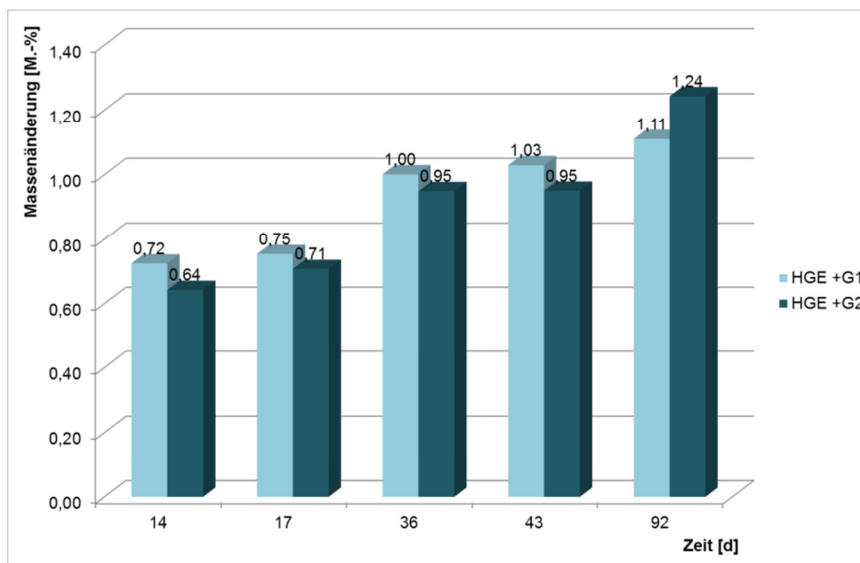


Bild 47 *Masseänderung des HGE<1 mm mit Gipsgesteinsbruch 0-8 mm mit unterschiedlichen Wasser-Fertigmörtel-Verhältnissen (HGE+G1 0,40 und HGE+G2 0,22)*

Die Ergebnisse der Längen- und Masseänderungen sind aus dem Bild 46 und Bild 47 ersichtlich. Auch hier wird deutlich, dass das Material nach längeren Reaktionszeiten noch Wasser aufnimmt. Das Gefüge des Mörtels mit einem höheren Wasser-Fertigmörtel-Verhältnis bildet offensichtlich ein Gefüge mit deutlich mehr Kapillarporosität aus. Infolgedessen können Transportvorgänge begünstigt ablaufen. Die etwas größere Masseänderung des Mörtels HGE+G2 nach 92 Tagen kann damit allerdings nicht erklärt werden. Hier muss der nächste Messtermin abgewartet werden. Die Längenänderungen des Mörtels HGE+G1 liegen etwas über dem mit niedrigerem Wasser-Fertigmörtel-

Verhältnis. Insgesamt sind die Längen- und Masseänderungen der Mörtel mit Gipsgesteinskörnung geringer als die der reinen Gipsmörtel. Es kann daher von einem Verdünnungseffekt durch die Gipsgesteinskörnung ausgegangen werden. Ein Verträglichkeitsproblem wurde bis zu diesem Zeitpunkt nicht beobachtet.

Insgesamt muss sich auf der Basis dieser Ergebnisse den Aussagen vieler Veröffentlichungen angeschlossen werden, dass lange Messzeiträume unter extremen Bedingungen notwendig sind, um starke Schädigungen eines Mauerwerks durch die Anwendung von ungeeigneten Materialien auszuschließen. Derzeit werden die Messungen bis zum Projektende fortgeführt.

Grenzflächen

Sehr wichtig erscheint in diesem Zusammenhang auch die Betrachtung der Grenzflächen zu sein. Insbesondere sulfatische Mörtel reagieren extrem sensibel auf einen Feuchtigkeitsentzug durch angrenzende Oberflächen. Steht nicht ausreichend Wasser in diesem Bereich für eine Hydratationsreaktion zur Verfügung, so kann das Material nicht die geplante Festigkeit entwickeln. Bild 49 zeigt den Einfluss von stark saugendem Sandstein auf einen HGE-Mörtel. Im Rahmen von Untersuchungen an der TU Dresden wurden in Prismenformen stark saugende Sandsteinplättchen eingelegt (Bild 48). Es wurden Versuche mit den Wasser-Fertigmörtel-Verhältnissen 0,18; 0,20 und 0,22 vorgenommen.

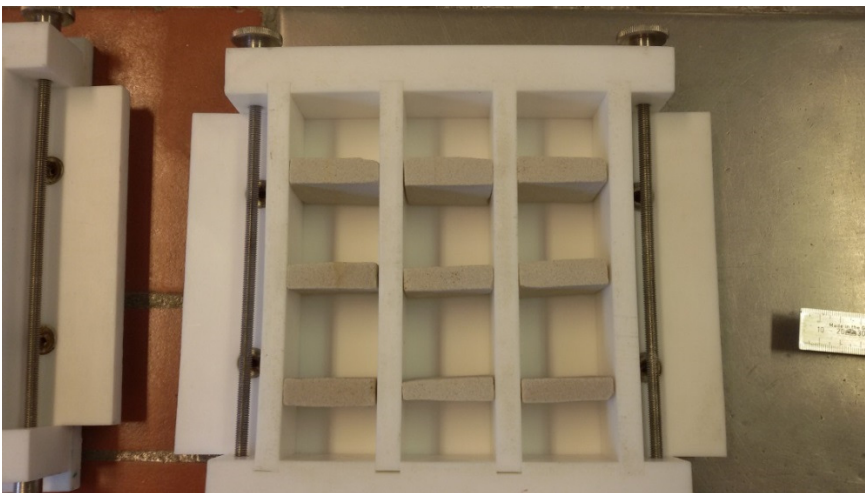


Bild 48 *Mörtelform mit eingefügten Sandsteinplättchen*



Bild 49 *Beachtung der Grenzflächen*

Direkt nach dem Einfüllen des Frischmörtels in die Form wurde ein extremer Wasserentzug im Frischmörtel deutlich (Bild 49). Bei einem höheren Wasser-Trockenmörtel-Wert ist keine gerissene Front direkt in der Grenzfläche Sandstein-Mörtel sichtbar. Auch hier zeigt sich ein Bereich mit Wasserentzug bis ca. 3 mm von der Sandsteinoberfläche (Bild 50).

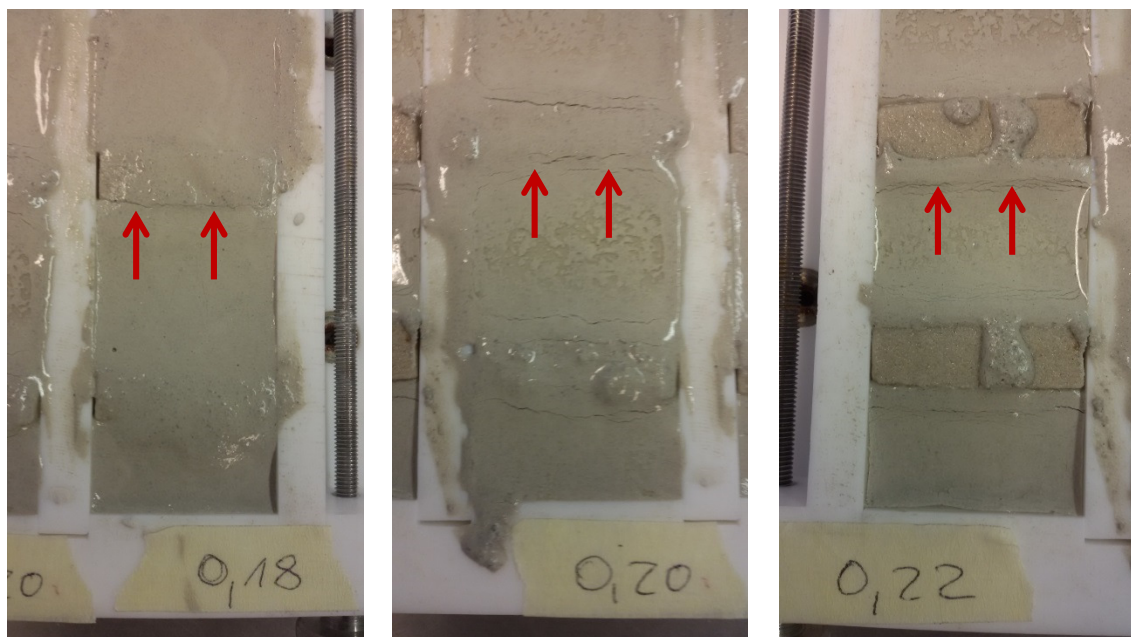


Bild 50 *Risse in der Grenzfläche Sandstein-Mörtel nach ca. 0,5 Stunden Reaktionszeit, leichtes Bluten beim Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,22*

Nach 18 Stunden Hydratation wurde deutlich, dass sich bei den Mörteln mit Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,18 und 0,20 direkt an der Grenzfläche Schwachstellen zeigen, bei einem Wert von 0,22 kam es nach einem Übergangsbereich von ca. 3 mm (Wasserentzug

und schnelleres Erstarren) zu einer Absenkung der Mörteloberfläche. Infolgedessen liegt die Schwachstelle hier im Übergangsbereich von Mörtel mit wenig Wasserangebot und Mörtel mit ausreichend Wasserangebot. Eine mechanische Belastung der Prismen bestätigt dies. Die Proben mit 0,18 und 0,20 versagen an der Grenzfläche Sandstein-Mörtel, die Probe mit 0,22 versagt bei Belastung im Mörtel (Bild 51).

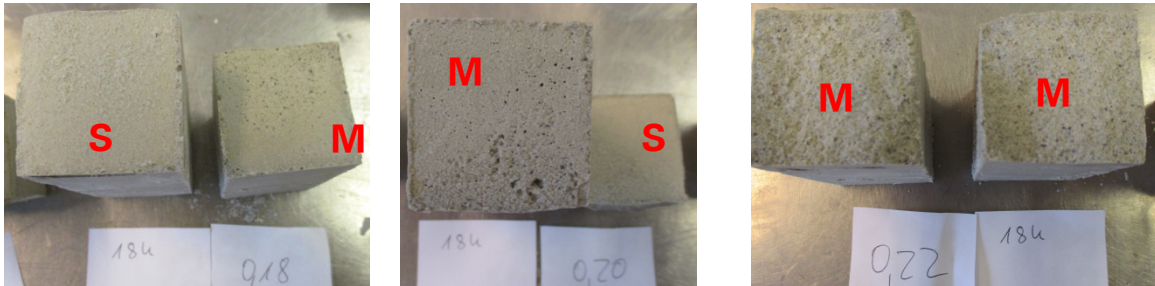


Bild 51 *Versagen in der Grenzfläche Sandstein-Mörtel bei Wasser-Trockenmörtel-Wert 0,18 und 0,20 nach ca. 18 Stunden Reaktionszeit, bei einem Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,22 Versagen im Mörtel (S-Sandstein, M-Mörtel)*

Durch den stark saugenden Sandstein wird bei niedrigen Wasser-Trockenmörtel-Werten kein gut hydratisiertes Mörtelgefüge auf der Sandsteinoberfläche ausgebildet. Infolgedessen findet bei mechanischer Belastung das Versagen direkt an der Grenzfläche statt. Bei Verwendung höherer Wasser-Trockenmörtel-Werte kann dieser Effekt in das Mörtelgefüge verlagert werden. Allerdings muss bei Verwendung höherer Wasser-Trockenmörtel-Werte ausgeschlossen werden, dass es zu negativen Effekten infolge von „Bluten“ kommt.

Deshalb ist es notwendig stark saugendes Material vor dem Einbringen einer Mörtelinjektion mit dem oben gewählten Material sehr gut vorzunässen und einen Injektionsmörtel mit ausreichendem Wasser-Trockenmörtel-Wert zu verwenden um einen guten Haftverbund zwischen dem umgebenden Mauerwerk und dem Gipsmörtel zu erreichen.

5.2.6 Geeignete Materialkombinationen für einen Injektionsmörtel

Im Verlauf des Projektes wurden knapp 60 Materialkombinationen für die Erstellung sulfathaltiger Mörtel untersucht. Sämtliche Mischungsansätze sind aus dem Anhang zu ersehen.

Im Ergebnis haben sich zwei grundsätzlich verschiedene Materialkombinationen herauskristallisiert welche zu günstigen Ergebnissen führen:

GM 31

β-Halbhydrat	10,0 M.-%
α- Halbhydrat	27,0 M.-%
Rostbandgips	60,0 M.-%
Tradical HH	3,0 M.-%
Seignettesalz	0,01 M.-%
Viscocrete 510 Sika	0,25 M.-%
Walocel MT 400 PFV	0,15 M.-%

W/F 0,40

Diese Materialkombination erwies sich fließfähig und zeigte kein Bluten. Der Erstarrungsbeginn lag nach 60 min.

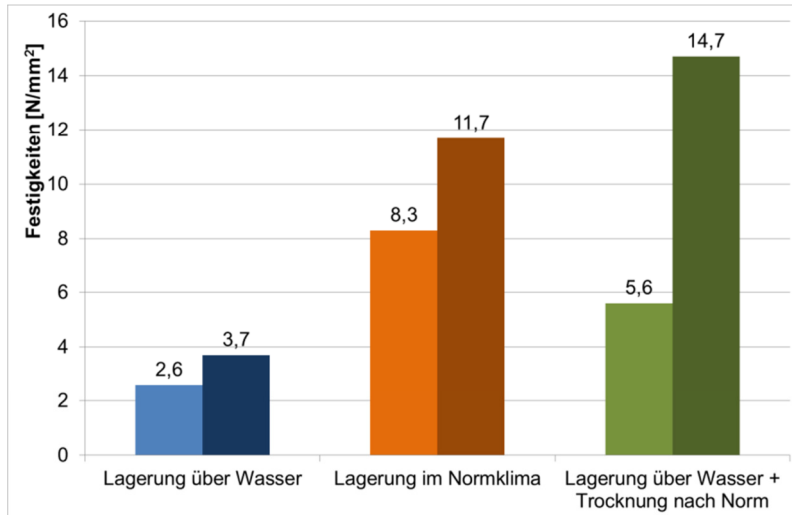


Bild 52 Festigkeiten des GM 31 durch Feuchtezustände; jeweils links Biegezugfestigkeit und rechts Druckfestigkeit

Die Längenänderungen dieses Mörtels wurden bis zu 28 Tagen Hydratationszeit verfolgt und lagen sowohl in der Lagerung über Wasser und auch bei der Trockenlagerung unter 0,5 mm/m. Die Nassrohdichte betrug 1,85 g/cm³ und die Trockenrohdichte 1,55 g/cm³.

Die zweite Materialkombination ist wie folgt:

GM 22

β-Halbhydrat	48,5 M.-%
α- Halbhydrat	48,5 M.-%
Tradical HH	3,0 M.-%
Seignettesalz	0,02 M.-%
W/F	0,5 (ohne Fließmittel)

Dieser Mörtel erwies sich als gut fließfähig. Der Erstarrungsbeginn lag nach 2:30h. Längenänderung nach 28 d betrug in der Lagerung über Wasser 0,05 mm/m. Dieser Mörtel zeigte ein leichtes Bluten. Die Nassrohdichte betrug 1,82 g/cm³. Die Festigkeitswerte nach Lagerung über Wasser sind aus Bild 53 zu ersehen. Eine Festigkeitsprüfung nach einem Tag Hydratationszeit nach Trocknung nach Norm ergab eine Druckfestigkeit von 16,3 N/mm².

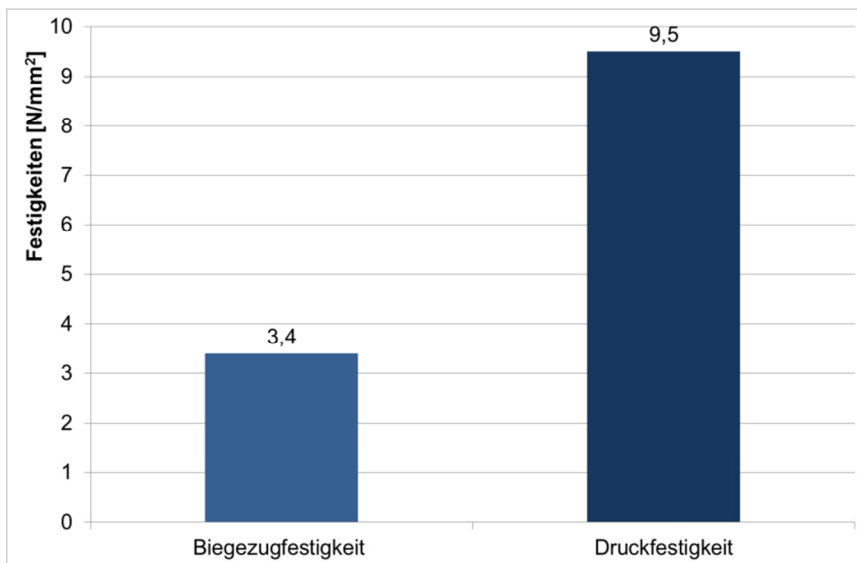


Bild 53 Festigkeiten des GM 22 nach 28tägiger Lagerung über Wasser; links Biegezugfestigkeit und rechts Druckfestigkeit (nass geprüft)

Beide Mischungen zeigten erfolgversprechende Eigenschaften. Sie wurden den Projektpartnern im September 2018 zur Optimierung vorgeschlagen. In einer Diskussion wurde festgelegt, sich von dem zwar preiswerteren aber auch mit mehr Unsicherheiten im Phasenbestand behafteten Rostbandgips zu lösen. **In der Folge wurde sich auf Mischungen aus Alpha- und Betahalbhydrat konzentriert.** Laut [91] zeigen Mischungen dieser Materialkombination auch eine erhöhte Wasserresistenz.

Um den Wasser-Feststoff-Wert zu senken und somit maximale Festigkeiten auszuloten, wurde der GM 22 wie folgt modifiziert:

GM 35

β-Halbhydrat	48,5 M.-%
α- Halbhydrat	48,5 M.-%
Radical HH	3,0 M.-%
Seignettesalz	0,01 M.-%
Viskocrete 510	0,25 M.-%
Walocelt MT 400 PFV	0,15 M.-%
W/F	0,4

Die Festigkeiten dieser Mischung zeigen auch unter feuchten Bedingungen hohe Werte (Druckfestigkeit 11,3 N/mm²). Dieser Mörtel wäre daher auch im feuchten Mauerwerk einsetzbar (Bild 54).

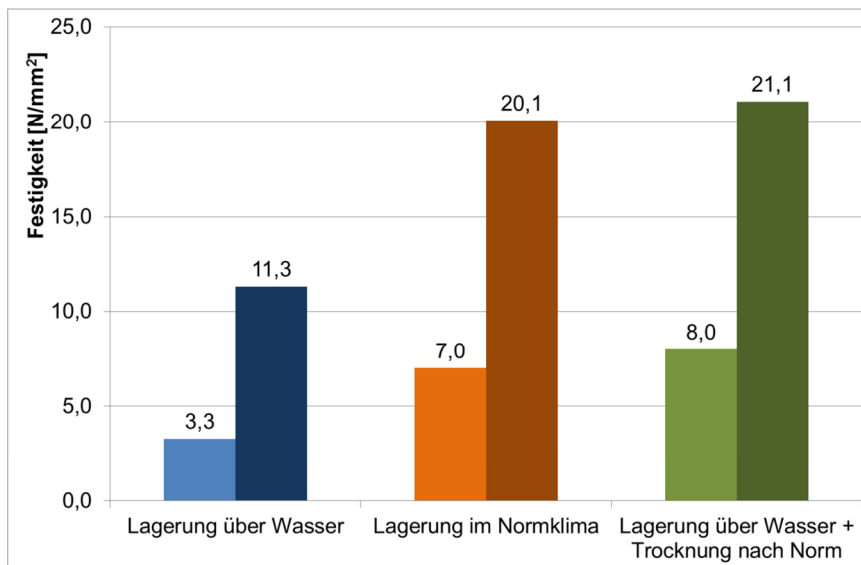


Bild 54 *Festigkeiten des GM 35 nach 32tägiger Lagerung; jeweils links Biegezugfestigkeit und rechts Druckfestigkeit*

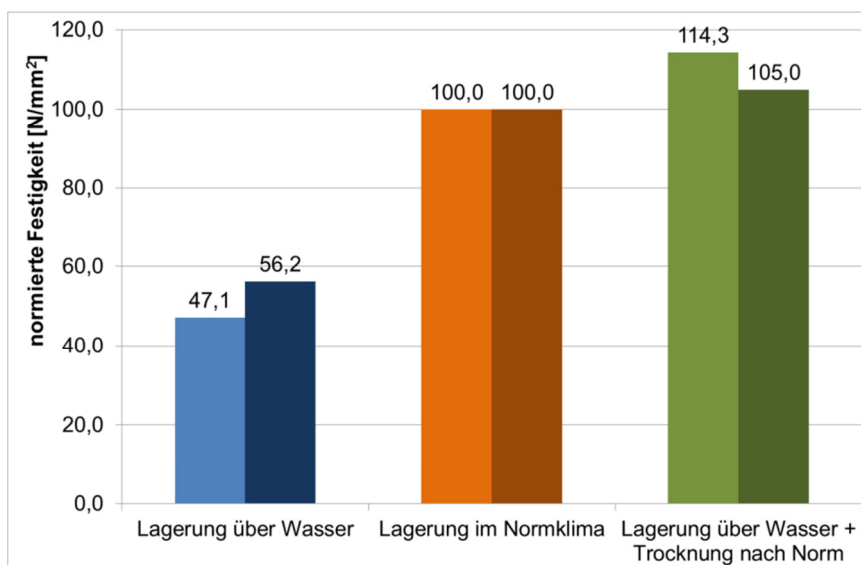


Bild 55 *Normierte Festigkeiten des GM 35 bezogen auf die Normallagerung; jeweils links Biegezugfestigkeit und rechts Druckfestigkeit*

Ein Bezug der Festigkeiten auf die Festigkeiten der Normallagerung (100%) dieser Mischung zeigt, dass die Feuchteabhängigkeit dieser Mischung nicht so extrem ist wie die aller anderen Mischungen - 47,1 % Biegezugfestigkeit und 56,2 % Druckfestigkeit bei einer Lagerung über Wasser gegenüber ca. 30-50 % der Festigkeiten bei den meisten anderen Mischungen (Bild 55). Auch die Erhöhung der Festigkeit durch eine Normtrocknung fällt gegenüber den anderen Mischungen niedriger aus. Infolgedessen wird diese Mischung als sehr stabil eingeschätzt.

Für einen Einsatz im historischen Mauerwerk sind der GM 22 und der GM 35 mit ihren hohen Festigkeiten lediglich als Ankermörtel geeignet. In der Folge wurde der Mörtel GM 22 abgemagert, beziehungsweise aus diesem Mörtel ein Schaummörtel entwickelt.

Variation des Kalkgehaltes (Tradical HH und Tradical HM)

Der oben beschriebene GM 22 wurde wie folgt variiert. Im Sulfatanteil waren 50 M.-% β -Halbhydrat und 50 M.-% α -Halbhydrat enthalten. Es wurden jeweils 3 M.-%; 5 M.-%; 10 M.-% und 20 M.-% des Mörtels durch Tradical HH und beziehungsweise Tradical HM als Füllstoff ersetzt. Dabei wurde zunächst der Wasser-Feststoffwert aus Gründen der Vergleichbarkeit mit 0,5 konstant gehalten. Mit steigendem Tradicalgehalt ergab sich bei gleichem Wasser-Feststoff-Wert eine deutlich festere Konsistenz. Mörtel mit 20 M.-% Tradical wiesen eine „gummiartige“ Konsistenz auf. Durch die Kalkzugabe erhöhte sich bis 10 M.-% die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn geringfügig. Dies ist vermutlich auf den Verdünnungseffekt zurückzuführen. Ab 20 M.-% Kalkzugabe scheinen die physikalischen Kräfte zu überwiegen und die Verarbeitungszeit wird deutlich verkürzt (Bild 56).

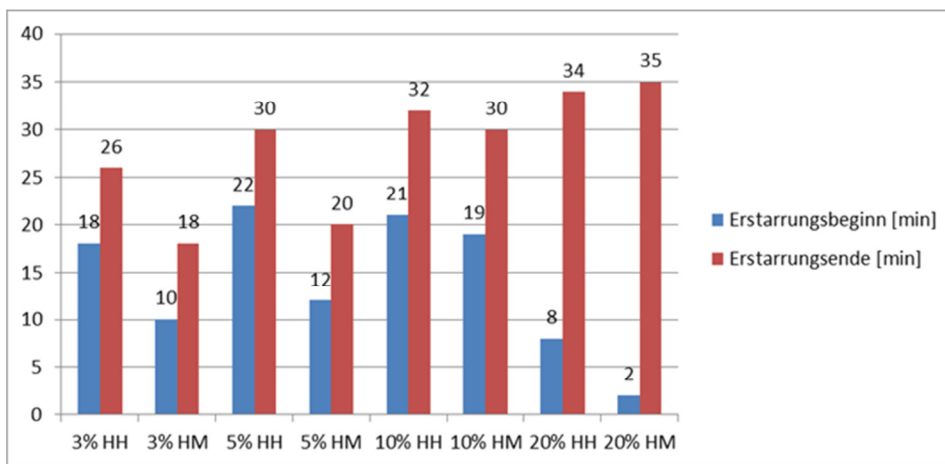


Bild 56 Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende der kalkmodifizierten Mörtel

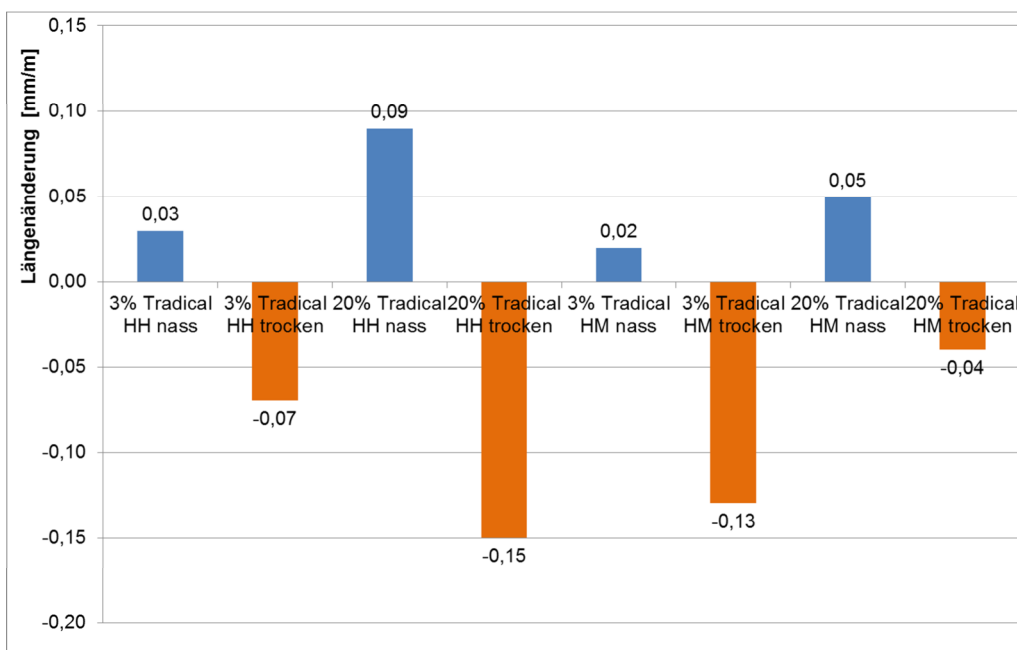


Bild 57 Längenänderungen nach 14 d von mit 3 M.-% und 20 M.-% Kalk modifizierten

Mörtel

Für die Mörtel mit 3 M.-% und 20 M.-% wurden die Längenänderungen bis 14 Tage Lagerungsdauer untersucht. Diese liegen insgesamt im Bereich der Nachweisgrenze, sind also sehr gering. Bei höheren Kalkgehalten scheinen sich etwas höhere Längenänderungen einzustellen (Ausnahme 20 M.-% Tradical HM). Möglicherweise reagiert Tradical HM etwas unempfindlicher gegenüber Feuchte (Bild 57).

Einfluss der Carbonatisierung

Für den geplanten Anwendungsfall des Mörtels im Mauerwerk kann nicht von einer Festigkeitsentwicklung infolge einer Carbonatisierung ausgegangen werden. Um derartige Bedingungen nachzustellen, hätten sämtliche Mörtelarbeiten in einer Glove-Box mit Inertgasspülung durchgeführt werden müssen. Dies war für die umfangreichen Laborarbeiten in diesem Projekt zu aufwendig.

Tradical wurde lediglich als Füllstoff zugegeben. Bei den gewählten Prüfbedingungen muss aber teilweise von einem Festigkeitszuwachs durch Carbonatisierung gerechnet werden. Dieser Zuwachs muss bei der Beurteilung in die Betrachtungen einbezogen werden.

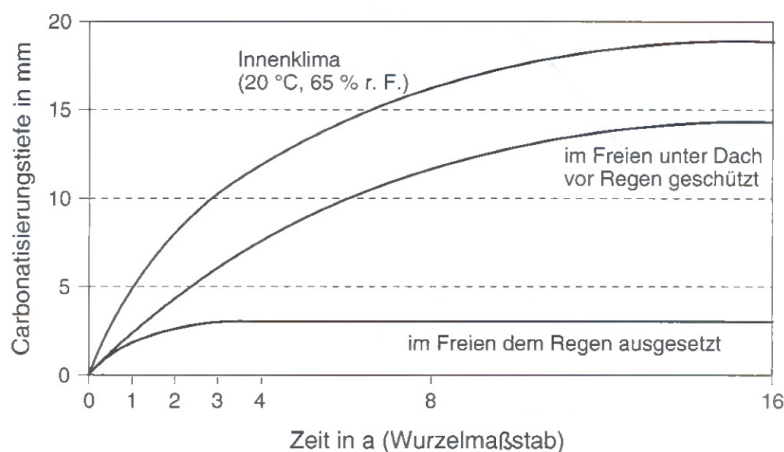


Bild 58 Carbonatisierungsfortschritt in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen, aus [92]

Stark beschreibt, dass durchfeuchteter Beton praktisch kein CO_2 aufnehmen kann. Ebenso kommt es bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% zu keiner Carbonatisierungsreaktion. Die ist auf die unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten von CO_2 im Gasraum ($1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) und im Wasser ($0,8 \text{ bis } 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) zurückzuführen. Infolgedessen kann die CO_2 -Diffusion im Gasraum ca. 10.000-mal schneller als im Wasser ablaufen. Die maximale Carbonatisierungsgeschwindigkeit ist bei 60 bis 80% relativer Luftfeuchte zu erwarten. In extrem trockenen Luftfeuchtigkeiten (<30%) läuft die Reaktion extrem langsam ab. [92]

Diese für Beton beschriebenen Gesetzmäßigkeiten laufen gleichartig bei kalkhaltigen Mörteln ab. Da dieses Material in der Regel deutlich poröser ist, können die Reaktionen deutlich beschleunigt gegenüber dem Beton ablaufen. Die Tendenzen gegenüber unterschiedlichen Lagerungsbedingungen gelten hier aber analog. Im Bild 58 ein Vergleich des Carbonatisierungsfortschritts des Betons bei verschiedenen Umweltbedingungen dargestellt.

Das Innenklima entspricht von den Parametern der von uns gewählten Normallagerung. Die Lagerung der Mörtelprismen über Wasser ist eine verstärkte Form der Lagerung im Freien dem Regen ausgesetzt. Bei dieser Lagerung ist in unseren Prüfzeiträumen von einer Festigkeitsentwicklung ohne oder nur mit sehr geringem Carbonatisierungsanteil auszugehen (Bild 59).

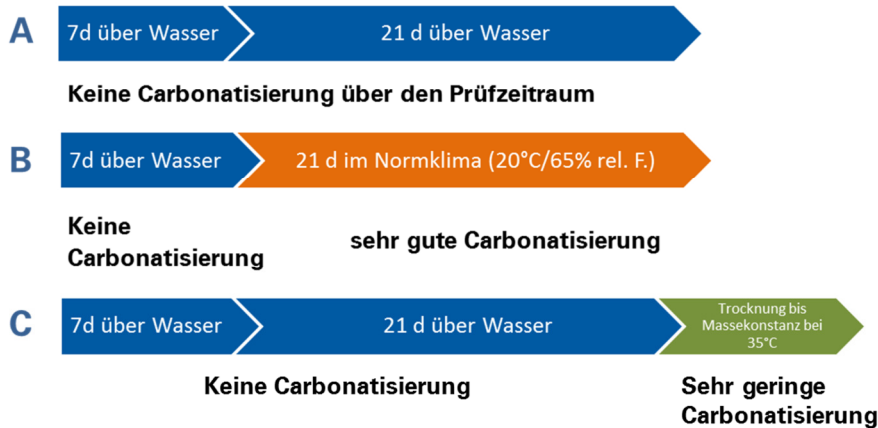


Bild 59 Carbonatisierung in den gewählten Prüfbedingungen

Die Bilder Bild 60 und Bild 61 zeigen die Festigkeiten der mit einem Kalkanteil modifizierten Mörtel. Die Festigkeiten der mit 3 M.-% Tradical HH versetzten Mischung zeigen das typische Bild eines sulfathaltigen Mörtels mit geringem Kalkanteil, welcher unter verschiedenen Bedingungen gelagert wurde. Die Festigkeit des 28 Tage feucht gelagerten und dann nach Norm geprüften Mörtels ist deutlich höher als die Prüfung unter nassen oder normalen Bedingungen (s. 5.2.1). Die niedrigen Festigkeiten des Mörtels mit 3 M.-% Tradical HM unter analogen Prüfbedingungen kann derzeit noch nicht erklärt werden.

Die Mischungen mit 20 M.-% Tradical zeigen erwartungsgemäß insgesamt niedrigere Festigkeiten. Auffällig ist hier, dass die Festigkeiten nach Normtrocknung niedriger sind als nach Normallagerung ohne Trocknung. Dies ist auf eine Carbonatisierung des Tradical in der Normallagerung und die damit verbundene Gefügeverdichtung, welche einen Festigkeitsanstieg, verursacht zurückzuführen.

Daraus ergibt sich, dass lediglich die Ergebnisse der Lagerungen C der verschiedenen Materialgemische untereinander vergleichbar sind⁴. Die Ergebnisse der Lagerung A werden durch den Festigkeitsabfall infolge Feuchtigkeit der unterschiedlich hohen Sulfatanteile verfälscht.

Somit kann festgestellt werden, dass bei einer Erhöhung des Anteils von Tradical HH um 17 M.-% die Normdruckfestigkeit (Lagerung C) um rund 76 % sinkt und die Biegezugfestigkeit entsprechend um 53 %.

Bei einer analogen Erhöhung des Anteils von Tradical HM fällt der Festigkeitsunterschied auf Grund insgesamt geringerer Festigkeiten geringer aus. Die Druckfestigkeit verringert sich um 45 % und die Biegezugfestigkeit um 47 %.

⁴ Unter Vernachlässigung des Carbonatisierungsanteils während der Trocknung.

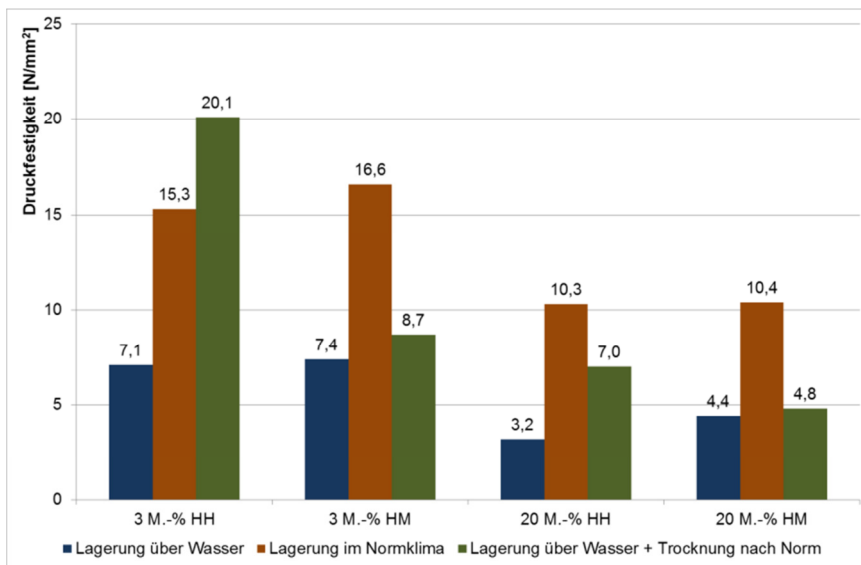


Bild 60 *Druckfestigkeit der kalkmodifizierten Mörtel*

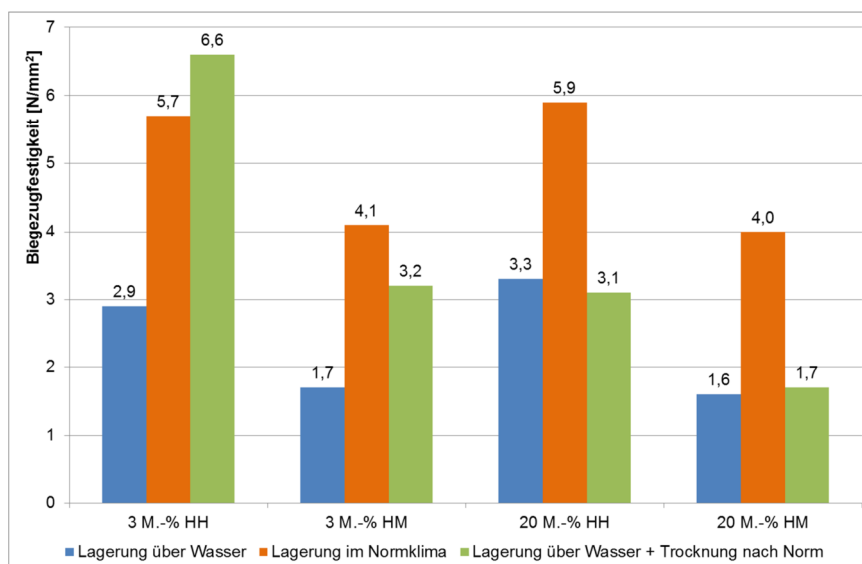


Bild 61 *Biegezugfestigkeit der kalkmodifizierten Mörtel*

Diese Untersuchungen berücksichtigen lediglich die chemischen Einflüsse, da der Wasser-Feststoff-Wert konstant gehalten wurde. Das bedingt bei hohen Kalkgehalten mit hoher Oberfläche sehr steife Mörtel (Bild 62). Diese sind praktisch nicht als Injektionsmörtel verwendbar. Infolgedessen wurde versucht, diese Mörtel in die Zielkonsistenz mit einem Fließmaß von 240-260 mm zu bringen. Erhöhte Wasser-Feststoff-Werte haben wesentlichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften eines Mörtels.

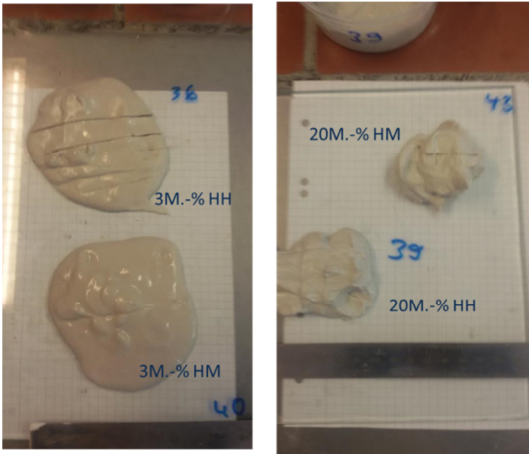


Bild 62 *Unterschiedliche Konsistenzen der Mörtel mit verschiedenem Kalkgehalt, links 3 % Tradical, rechts 20 % Tradical*

Materialoptimierung durch Tradicalzusatz

Zur Senkung der Trockenfestigkeiten wurden der GM 22 mit 10 M.-%; 20 M.-% und 30 M.-% des Halbhydrates durch Tradical HH ersetzt. Dabei wurde versucht, ein Fließmaß von 240-260 mm ohne Bluten einzustellen. Eine Trocknung nach Norm wurde bei diesen Mörteln nicht durchgeführt.

GM 51

β-Halbhydrat	45,0 M.-%
α- Halbhydrat	45,0 M.-%
Tradical HH	10,0 M.-%
Seignettesalz	0,02 M.-%
W/F	0,48

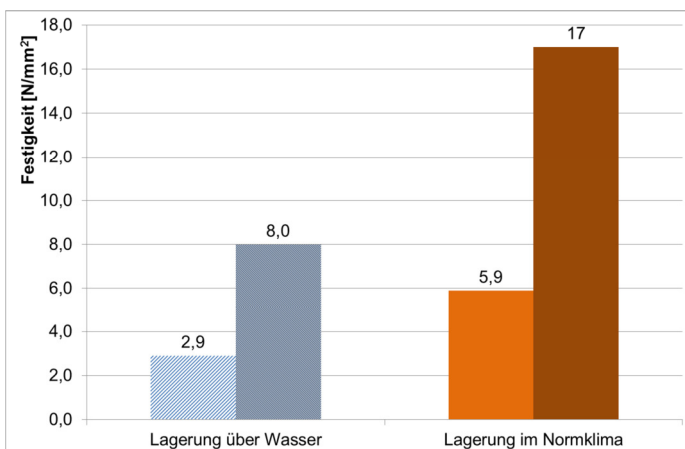


Bild 63 *Festigkeiten des GM 51 nach 7tägiger Lagerung über Wasser und 22tägiger Normallagerung; jeweils links Biegezugfestigkeit und rechts Druckfestigkeit*

Für diese Mischung liegen nur Prüfwerte zu zwei unterschiedlichen Zeiten vor. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Gipshydratation nach 7d weitestgehend abgeschlossen ist, so können diese Werte dennoch orientierend in die Betrachtungen einbezogen werden (Bild 63).

GM 50B

β-Halbhydrat	40,0 M.-%
α- Halbhydrat	40,0 M.-%
Tradical HH	20,0 M.-%
Seignettesalz	0,02 M.-%
W/F	0,60

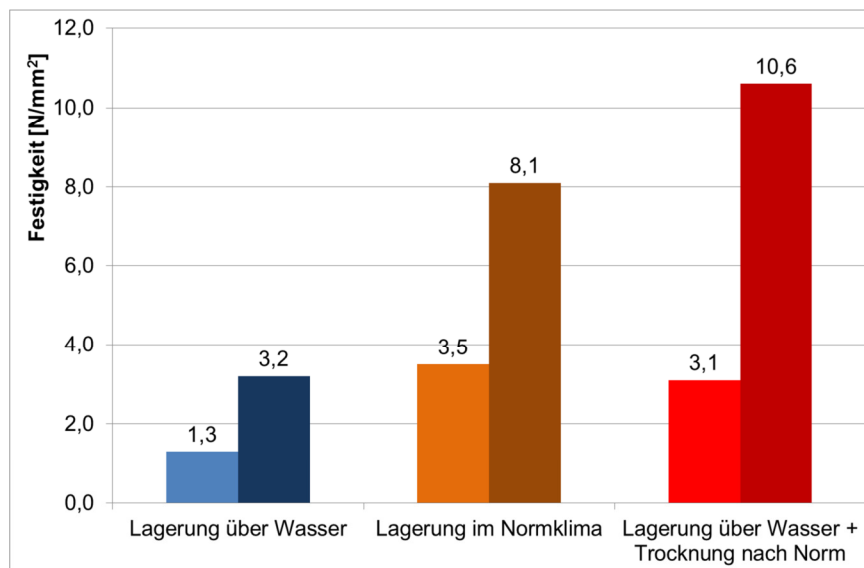


Bild 64 Festigkeiten des GM 50B (20 M.-% Tradical HH) nach 37tägiger Lagerung; jeweils links Biegezugfestigkeit und rechts Druckfestigkeit

GM 57

β-Halbhydrat	35,0 M.-%
α- Halbhydrat	35,0 M.-%
Tradical HH	30,0 M.-%
Seignettesalz	0,02 M.-%
Viscocrete 510	0,25 M.-%
W/F	0,50

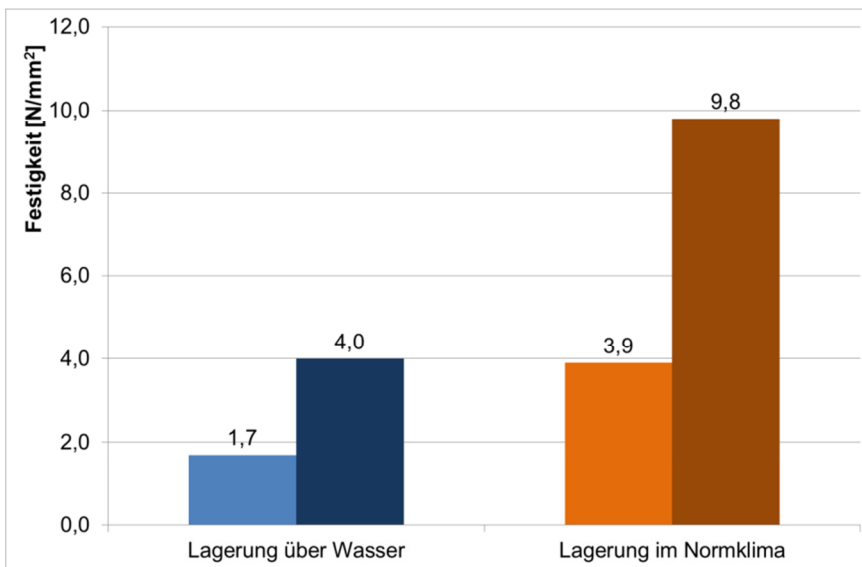


Bild 65 *Festigkeiten des GM 57 nach 35tägiger Lagerung; jeweils links Biegezugfestigkeit und rechts Druckfestigkeit*

Diese Mischung zeigte Schwinderscheinungen und wurde deshalb nicht für weitere Versuche favorisiert. Die Höhe der Prismen betrug ca. 3,8 – 3,9 mm.

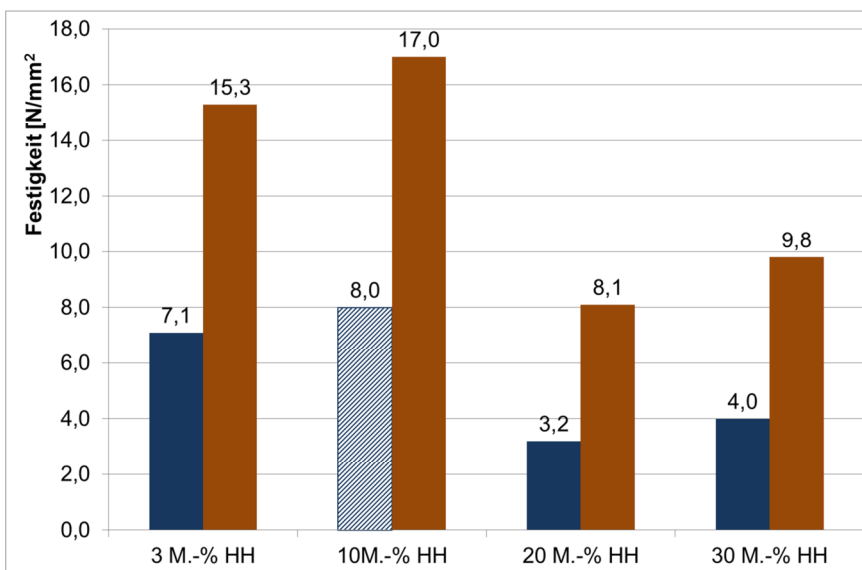


Bild 66 Druckfestigkeiten der Gipsmörtel

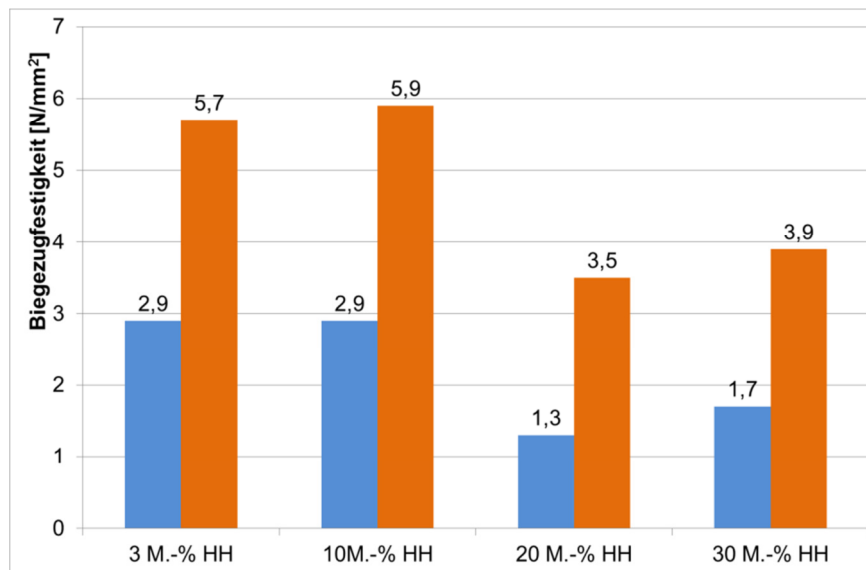


Bild 67 *Biegezugfestigkeiten der Gipsmörtel*

Die Bilder Bild 63 bis Bild 67 zeigen die Festigkeiten der mit unterschiedlichen Kalkgehalten modifizierten Mörtel mit einem Fließmaß von 240-260 mm. Die Festigkeiten der mit 10 M.-% Tradical HH versetzten Mischung zeigen das typische Bild eines sulfathaltigen Mörtels mit geringem Kalkanteil, welcher unter verschiedenen Bedingungen gelagert wurde. Die Festigkeit des normalgelagerten Mörtels ist deutlich höher als die der unter nassen Bedingungen gelagerten Mörtels.

Die Mischungen mit 20 M.-% Tradical zeigen analog zu den vorhergehenden Untersuchungen insgesamt niedrigere Festigkeiten als die Mörtel mit einem geringeren Kalkgehalt. Die Nassdruck- und -biegezugfestigkeiten sinken um ca. 55%. Dagegen sinkt die Druckfestigkeit der normalgelagerten Proben um ca. 49% und die Biegezugfestigkeit um ca. 39%. Allerdings zeigen die Mörtel mit 30 M.-% Tradical wieder etwas höhere Festigkeitswerte (Bild 68). Dies ist auf die starken Schwinderscheinungen zurückzuführen. Daraus folgend wurden nicht normgerechte Prismen mit geprüft, was fälschlich zu erhöhten Festigkeitswerten führt.

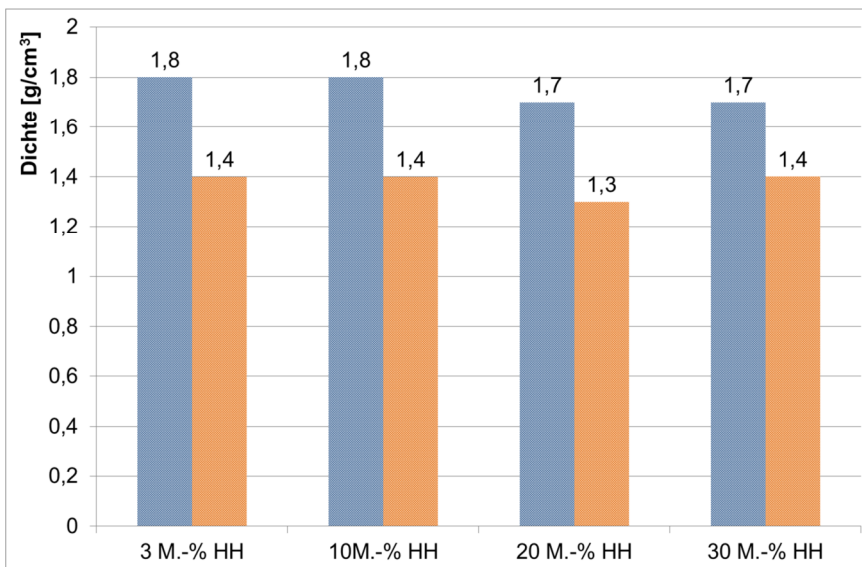


Bild 68 Rohdichte nach Lagerung über Wasser und nach Normallagerung der Mischungen mit unterschiedlichen Tricalgehaltem

Ergebnisse der Versuche zur Variation des Kalkgehaltes im Injektionsmörtel

Es wurden zwei Messreihen zur Optimierung des Kalkgehaltes im calciumsulfatgebundenen System durchgeführt. Dabei wurde zunächst der W/F-Wert konstant gehalten und in einem weiteren Schritt der W/F-Wert zugunsten eines Fließmaßes von ca. 240-260 mm variiert.

Dabei kristallisierte sich heraus, dass wahrscheinlich ein optimaler Kalkgehalt als Füllmittel bei ca. 10 M.-% liegt. Dieses Ergebnis müsste in weiteren Untersuchungen statistisch untermauert werden. Weiterhin könnte die Auswirkung eines Kalkanteils von 15 M.-% getestet werden. Die Längenänderungen aller Mischungen aus Alpha- und Betahalbhydrat waren sehr gering.

5.3 Erstellung eines neuen geschäumten Materials auf Calciumsulfatbasis

5.3.1 Schäumbarkeit

Die folgenden Erfahrungen gibt es für die Schäumbarkeit von sulfatischen Baustoffen:

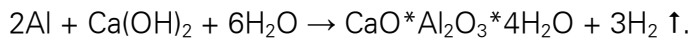
- β -Halbhydrat (Stuckgips) → sehr gut
- α -Halbhydrat (Autoklavgips) → gut in Kombination
- Rostbandgips (Mehrphasengips, Putzgips) → schlecht
- Hochbrandgips (Mehrphasengips, hoher Anhydritanteil) → ganz schlecht

5.3.2 Versuche mit Aluminiumpulver

Auf Wunsch eines Projektpartners wurde die Verwendung von Aluminiumpulver getestet. Die Verwendung von Aluminiumpulver ist seit vielen Jahren in der Porenbetonindustrie, in verschiedenen Putzsystemen sowie in Verfüllmassen üblich.

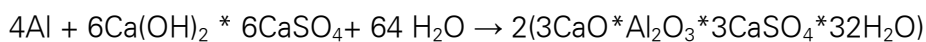
Porenbeton im allgemeinen Verständnis wird aus Kalk, Zement, geringe Mengen Anhydrit/Gips, Sand, Wasser und metallischem Aluminium hergestellt. Während der Reaktion der Ausgangsstoffe reagiert das freie Aluminium zu Calciumaluminat. Bei

dieser Reaktion wird Wasserstoff frei, welcher entweicht und Poren mit einem Durchmesser von 0,5 mm bis 1,5 mm (luftgefüllt) zurücklässt:



Eine Verwendung in calciumsulfathaltigen Mörtelsystemen ist nicht bekannt. Eine Steuerung des Ausdehnungsverhaltens eines Injektionsmörtel im Mauerwerk scheint risikobehaftet. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass sich keine explosiven Wasserstoff-Luft-Gemische bilden und dass der (in zementgebundenen Baustoffen) entstehende Wasserstoff ungehindert entweichen kann. Auch dies ist im Mauerwerk als kritisch zu betrachten.

Während der Reaktion von Gipsmörteln ändert sich durch den Hauptanteil Sulfat die Reaktionsgleichung:



Es wird theoretisch kein Wasserstoff frei und das Hauptreaktionsprodukt ist Ettringit, welches sofort nach Wasserzutritt entsteht. Infolgedessen ist bei der Reaktion eines Gipsmörtels mit geringem Kalkanteil nicht mit einer Schaumbildung zu rechnen. Ungeachtet dessen wurden Vorversuche mit zwei Produkten vorgenommen.

Für eine Fertigmörtelmischung sind Ausgangsstoffe ohne Gefahrenpotential wünschenswert. Daher wurden zwei Aluminium-Kalksteinmischungen der ECKART GmbH, Günterstal 4, 91235 Hartenstein, Deutschland angewendet (RO 260 und RO 560 jeweils mit 10% metallischem Aluminium und 90% Kalk, RO 560 besitzt ein feineres Kornband gegenüber RO 260). Von der Herstellerfirma werden 0,01 bis 0,05% Aluminium für Verfüllmörtel empfohlen, der generelle Einsatz in Baustoffen erfolgt bis 0,5 M.-%.

Die Versuche wurden mit einem Gipsmörtel bestehend aus 48,5 M.-% α -Halbhydrat und 48,5 M.-% β -Halbhydrat sowie 3 M.-% Tradical HH durchgeführt. Die Dosierung wurde von 0,1 bis 1 M.-% gewählt. Es konnte innerhalb von vier Versuchen keine Luftporenbildung beobachten werden, es kam zu keiner Gasentwicklung.



Bild 69 *Blasenfreier Frischmörtel nach 5 min Reaktionszeit*

Die Mörtel wurden bis zum Erstarrungsende beobachtet. Durch die Zugabe des Al-Kalksteinpulvers wurde lediglich eine geringfügige Verzögerung der Abbindereaktion beobachtet.

Im Ergebnis wird festgestellt, dass theoretische Betrachtungen und praktische Versuche zeigen, dass der Einsatz von Aluminiumpulver für die Luftporenbildung im vorwiegend calciumsulfathaltigen System nicht geeignet ist. Wahrscheinlich wird das reaktionsfähige Aluminium sofort für eine Ettringitbildung verbraucht. Während dieser Reaktion wird kein porenbildender Wasserstoff frei.

5.3.3 Versuche mit konventionellen Schaumbildnern

Weitere Versuche zur Schaumbildung wurden mit drei Produkten von MC Bauchemie und einem Produkt von Innotec vorgenommen:

- MC Oxal PLB 6 (2,5%ige Stammlösung, Luftporenbildnerkonzentrat auf der Basis von Proteinen)
- MC Centripor SK 155 (3%ige Lösung)
- MC Centripor SK 120 (3%ige Lösung)
- Innotec K1/K3

In einem ersten Schritt wurde nach folgender Matrix die Wirksamkeit für 2 Schaumbilder für die Anwendung in vier Mörteln auf vollkommen unterschiedlicher Rohstoffbasis untersucht.

Dafür wurden der HGE-Mörtel, der Fertigmörtel Oxal VP II T von MC Bauchemie, Hochbrandgips Keuper, Manufaktur Hundisburg und ein ausländischer Hochbrandgips genutzt (HBG A).



Tabelle 7: Eigenschaften von Schaummörtelmischungen

Bezeichnung	Material	W-Fst.-Wert	Schaumbildner	Verhältnis: Schaum:Mörtel	Dichte [g/cm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Bewertung
HGE 1	Casusan-Historischer Gipsestrich, CASEA	0,22	K1/K3	1:1	0,98	1,5	3,4	Ausschalen erst nach 15d möglich, danach Normallagerung
HGE 2		0,22	K1/K3	1:2	1,4	2,7	5,0	keine stabile homogene Mischung
HGE 3		0,22	Oxal PLB 6	1:1	1,9	1,0	8,5	kein Schaum-Mörtel, nicht formstabil
VP II 1	Oxal VP II T, MC Bauchemie	0,42	K1/K3	1:1	0,65	nicht meßbar		formstabil
VP II 2		0,42	K1/K3	1:2	0,86	0,9	2,1	formstabil
VP II 3		0,42	Oxal PLB 6	1:1	0,72	0,7	1,3	formstabil
HBG 1	Hochbrandgips Keuper, Manufaktur Hundisburg	0,3	K1/K3	1:1	0,9	nicht meßbar		formstabil
HBG 2		0,3	K1/K3	1:2	1,2 (38d)	0,9	1,4	formstabil
HBG 3		0,3	Oxal PLB 6	1:1	1,1 (38d)	2,2 (38d)	6,6 (38d)	-
HBG A	Hochbrandgips Ausland	0,63	K1/K3	1:1	Nicht bestimmbar	nicht meßbar		Mäßig formstabil, sehr krümmelig

Der Trasskalkmörtel Oxal VP II ließ sich erwartungsgemäß gut mit einem Schaumbildner derselben Herstellerfirma schäumen. Der Schaumbildner K1/K3 führte lediglich bei einem Schaum:Mörtel-verhältnis von 1:2 zu einem prüfbar Ergebnis. Beide Schaumbildner führten zu einer sehr geringen Rohdichte und Festigkeit.

Da sich beim ungeschäumten Hochbrandtgrips hohe Festigkeiten entwickeln können, wurden mehrere Hochbrandtgripse auf ihre Schäumbarkeit getestet. Leider zeigte sich in Anlehnung an bisherige Erfahrungen (5.3.1), dass geschäumter Hochbrandtgrips sehr lange Zeit bis zur Erstarrung benötigt und dass nur sehr geringe Festigkeiten ausgebildet werden. Messbare Festigkeiten konnten lediglich in Lagerung B für den HGE von CASEA mit einem Schaum:Mörtel-Verhältnis von 1:1 mit dem Schaumbildner K1/K3 nachgewiesen werden.

5.3.4 Einsatz von CASEA-Hochbrandtgrips für einen Injektionsschaummörtel

Dem Schaumbildner und Stabilisierer Innotec K1/K3 (10:1) wurde im Verhältnis 1:6 Wasser zugegeben. Aus dieser Mischung wurde ein stabiler Schaum hergestellt. Anschließend wurde der HGE-Fertigmörtel mit Wasser (Wasser-Fertigmörtel-Wert 0,22) gemischt. Darauf Folgend wurde der Schaum volumetrisch im Verhältnis 1:1 bzw. 1:2 (zwei Teile Mörtel, ein Teil Schaum) innerhalb von maximal 60 s untergemischt. Die Mischung ergab für beide Volumenverhältnisse einen stabilen Fertigmörtel. Das Ausschalen war auf Grund einer sehr geringen Festigkeit erst nach einer Woche möglich (bis dahin Lagerung im Feuchtekasten). Bei einer Normallagerung konnte eine Druckfestigkeit nach 28d von $5,9 \text{ N/mm}^2$ und eine Biegezugfestigkeit nach 28d von $2,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden (Schaum:Mörtel 1:1).

Eine Lagerung über Wasser führte bei einem Mörtel:Schaum-Verhältnis von 1:1 nur zu einem mit der Hand verformbaren Material. Lediglich für ein Mörtel : Schaum-Verhältnis von 2:1 war die Längen- und Masseänderungsmessung möglich (Bild 70 und Bild 71). Nach knapp 120 Tagen Hydratationszeit zeigte der Schaummörtel unter nassen Bedingungen eine Längenänderung von $0,56 \text{ mm/m}$. Dieselbe Mischung zeigt unter trockenen Lagerungsbedingungen ein sehr geringes Schwinden. Analog erfolgt nach einer sehr schnellen Austrocknung der Prismen keine weitere Masseänderung. Unter feuchten Bedingungen wurde hingegen über den gesamten Prüfzeitraum weiter geringfügig Wasser aufgenommen. Es zeigen sich dieselben Tendenzen wie beim ungeschäumten Material in abgeschwächter Form (siehe 5.2.5). Unter trockenen Bedingungen bildet sich eine Dichte von $1,2 \text{ g/cm}^3$ aus, unter nassen Bedingungen erhöht sich die Dichte auf $1,6 \text{ g/cm}^3$.

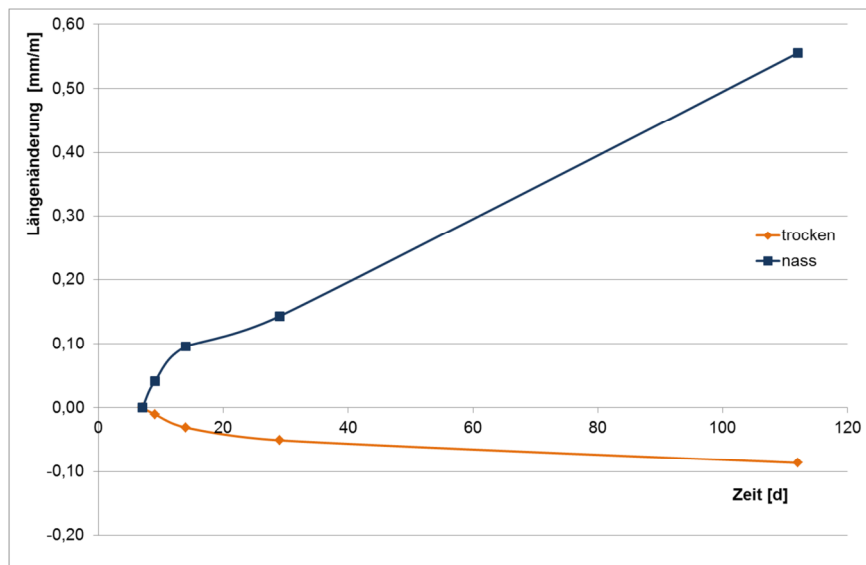


Bild 70 *Längenänderungen der CASEA-HGE-Schaummörtelmischungen (Mörtel:Schaum-Verhältnis 2:1), Lagerung über Wasser (nass) und Normallagerung bei 20°C und 65% rel. Feuchte (trocken)*

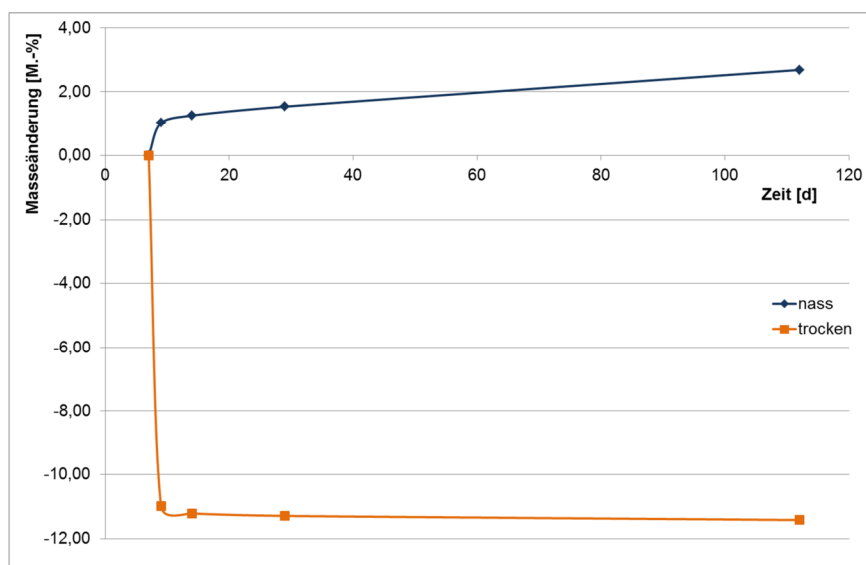


Bild 71 *Masseänderungen der CASEA-HGE-Schaummörtelmischungen*

Im Ergebnis muss festgestellt werden, dass es möglich ist, mit einem HGE-Mörtel einen gut verarbeitbaren, formstabilen Frischmörtel herzustellen. Unter trockenen Umgebungsbedingungen verhält sich das Material weiter formstabil und kann für bestimmte Anwendungsfälle genutzt werden. Das Material härtet zu einem nicht ganz homogenen Festmörtel aus (Bild 72). Die sehr geringe Dichte gegenüber herkömmlichen Injektionsmörteln stellt einen positiven Aspekt dar. Die dargestellten Eigenschaften würden das Verfüllen von Hohlräumen im sehr trockenen Mauerwerk erlauben.

Unter feuchten Umgebungsbedingungen bzw. unter Bedingungen, die kein Austrocknen des Mauerwerks erlauben ist eine Anwendung dieses Schaummörtels nicht zu empfehlen, da ein „schmieriges“, „krümeliges“ Material ohne Festigkeitsentwicklung keine positiven Aspekte bringt, eher das Mauerwerk noch zusätzlich belastet.

Diese Ergebnisse decken sich mit Erfahrungen die mit anderen Hochbrandgipsen gemacht wurden. Obwohl das Material ungeschäumt sehr hohe Festigkeiten erreichen kann, führt die Zugabe eines Schaumes zur Verhinderung der Festigkeitsausbildung.

Warum Hochbrandgipse so schlecht schäumbar sind, konnte innerhalb dieses Projektes nicht geklärt werden. Dieses Phänomen sollte innerhalb der Grundlagenforschung geklärt werden.



Bild 72 CASEA-HGE-Schaummörtelprisma, rechts Bruchfläche

5.3.5 Schaummörtel

In Anlehnung an die positive Festigkeitsentwicklung des GM 22 wurde diese Mischung mit einem Schaum aus Innotec K1/K3 in unterschiedlichen Verhältnissen geschäumt. Dieser Schaummörtel verhält sich formstabil und entwickelt gute Festigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte (Bild 76).

GM 23

β-Halbhydrat	48,5 M.-%
α- Halbhydrat	48,5 M.-%
Tradical HH	3,0 M.-%
W/F-Wert	0,5
Seignettesalz	0,02 M.-%
Innotec K1 + K3	

Bei einem Mörtel:Schaum-Verhältnis von 1:1 wird eine nur sehr geringe Festigkeit auf Grund der sehr geringen Dichte ausgebildet (Bild 75). Hier konnte in der Prüfung lediglich eine geringe Biegezugfestigkeit ermittelt werden. Die Festigkeiten können durch geänderte Mörtel:Schaum-Verhältnisse, im getesteten Fall 1:0,8 oder 1:0,5, deutlich erhöht werden. Mit diesen Mischungen konnten Festigkeiten nach 28d von 5 N/mm^2 und größer bei

Einstellung einer Rohdichte (trocken) von ca. 1 g/cm^3 erreicht werden (siehe Bild 73 und Bild 74). Günstig erscheint es daher, ein System je nach Anwendungsfall einstellen. Je nach Festigkeitsanforderungen und den herrschenden Bedingungen im Mauerwerk kann über das Mörtel:Schaum-Verhältnis eine günstige Festmörtelrohichte – und damit Festigkeit – eingestellt werden (Bild 75 und Bild 76).

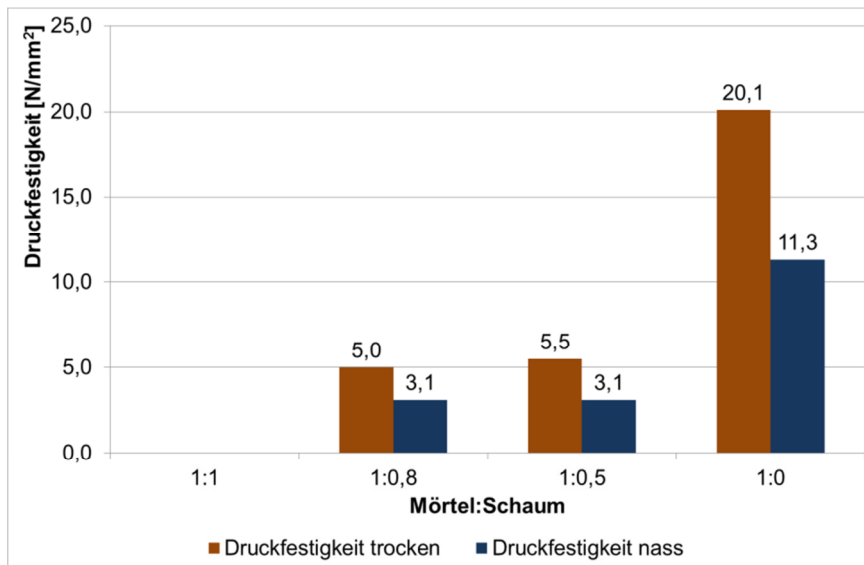


Bild 73 *Druckfestigkeit der geschäumten Mörtel*

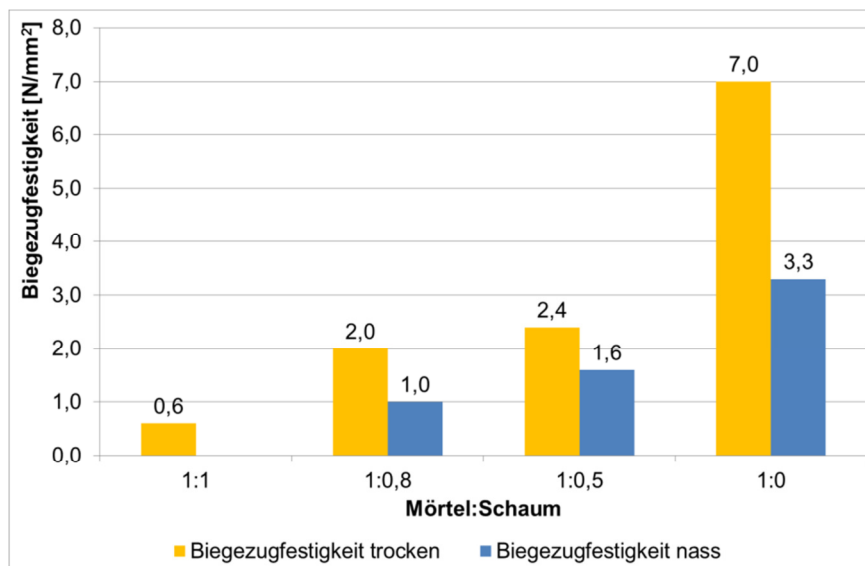


Bild 74 *Biegezugfestigkeit der geschäumten Mörtel*

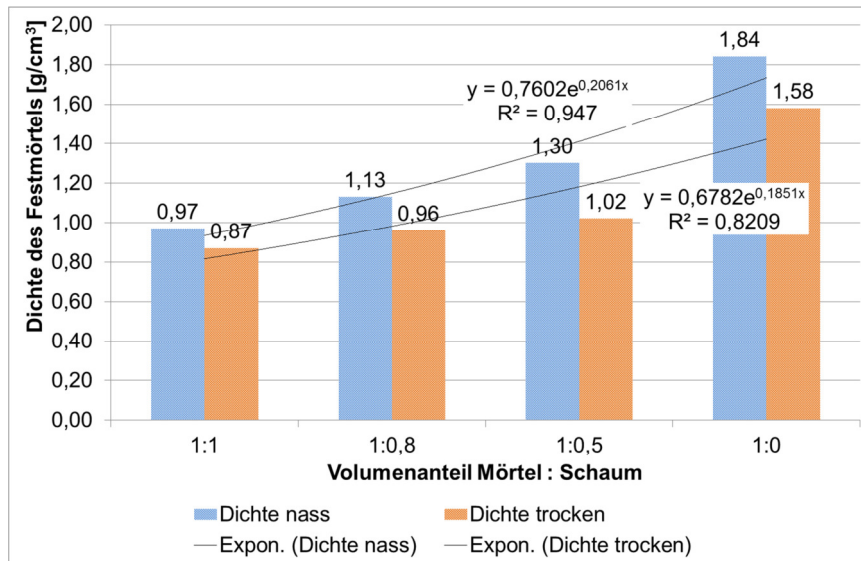


Bild 75 *Dichteänderungen der Schaummörtelmischungen in Abhängigkeit vom Mörtel:Schaum-Verhältnis*

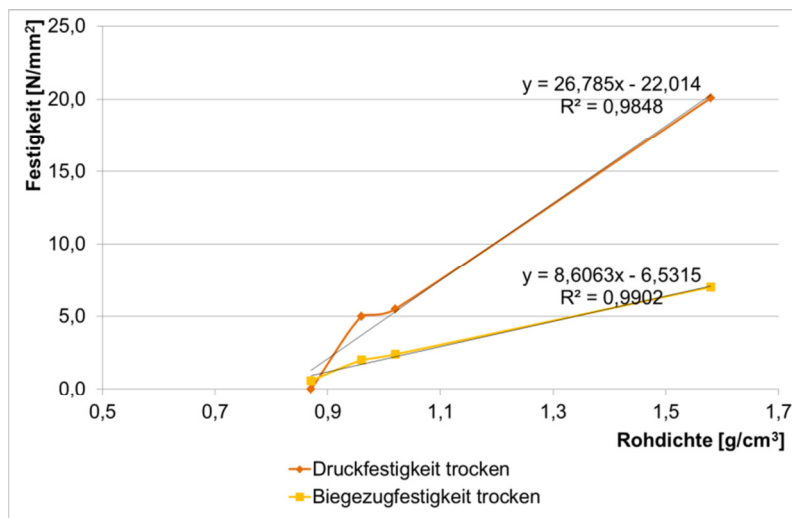


Bild 76 *Beziehung Rohdichte-Festigkeit der Schaummörtelmischungen*

6 Simulation des Mauerwerksversagens

Während der Prüfung der Sulfatbeständigkeit stellt sich die Frage, ab welcher ermittelten Längenänderung (eindimensionales Verfahren) eine Schädigung des Mauerwerks eintritt. Dreuse/ Zier [84] belegten, dass es ab Längenänderungen von 2 mm/m augenscheinlich sichtbare Schädigungen gibt. Erfahrungen zeigen, dass der Abfall des dynamischen E-Moduls erst ab dieser Schädigung erfasst wird. Es ist anzunehmen, dass dies auf die in der Regel relativ großen Prüfabstände bei Prüfungen über viele Jahre zurückzuführen ist. Deshalb wurde ein Beispiel für ein Ziegelmauerwerk modelliert, indem die Längenänderung von 1 mm/m als thermische Dehnung angesetzt wurde (thermisches Quellen). Dabei wurden die Spannungszustände für unterschiedliche Systeme ermittelt [90].

6.1 Eingangsdaten

6.1.1 Grundannahmen

Die Simulation wurde unter den folgen vereinfachenden Grundannahmen durchgeführt:

- das Material wurde ohne Eigengewicht angenommen,
- ohne Haftzugfestigkeit erfolgt ein sofortiges Versagen (System 1),
- Ebener Spannungszustand (2D),
- die Steine verhalten sich linear-elastisch sowie
- die Zug- und Haftscherfestigkeit der Lagerfugen sind gleich.

6.1.2 Geometrie

Für die Simulation eines **Kleinmodells** wurde die Symmetrie eines Ziegelmauerwerks ausgenutzt und nur $\frac{1}{4}$ modelliert (Bild 77) und Bild 78).

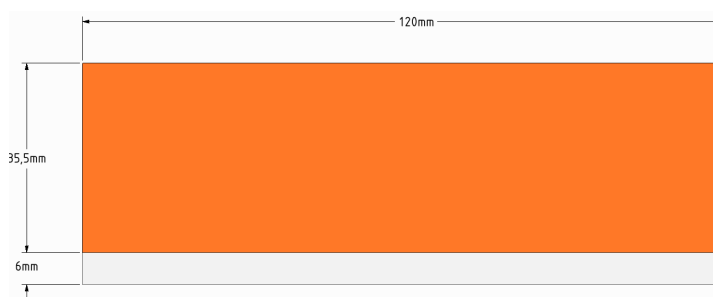


Bild 77 Systemabmessungen unter Ausnutzung der Symmetrien

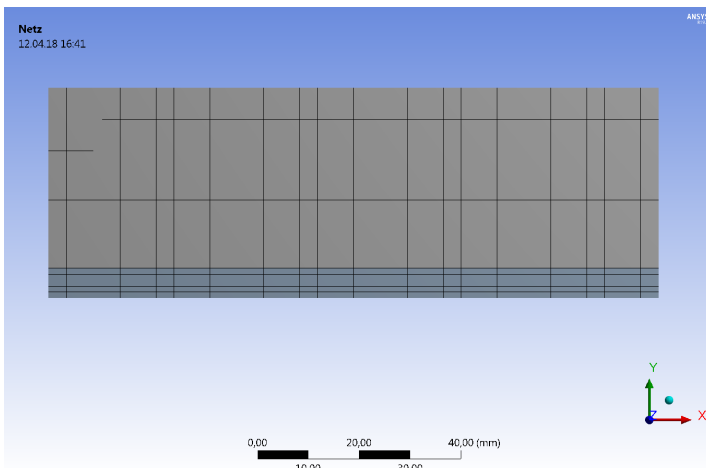


Bild 78 Vernetzung

Zur Veranschaulichung wurde ein etwas größerer Bereich eines Normalformat-Mauerwerks modelliert (Mauerwerksausschnitt) und in Wandmitte ein kleiner Fugenbereich für das Quellen angenommen:

6.1.3 Materialdaten

Da die Ergebnisse neben den Geometrieannahmen von diversen Materialdaten abhängen, die nicht alle statistisch abgesichert in Vorversuchen ermittelt werden konnten, wurden einige Grundvereinfachungen festgelegt. Von diesen Festlegungen ausgehend wurden einige Faktoren variiert und deren Einfluss untersucht.

Eine grundlegende Annahme ist das Materialverhalten nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit. Bei Zugbeanspruchung wird von einem spröden Versagen ausgegangen, im Druckbereich dagegen von ideal-plastischem Verhalten.

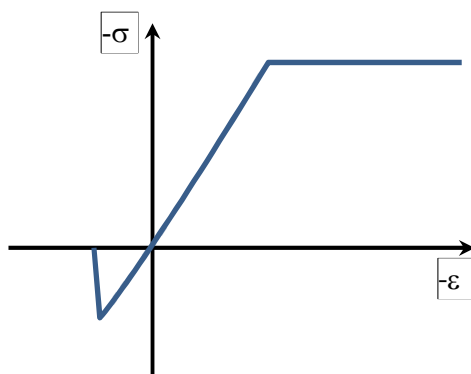


Bild 79 : Qualitatives Materialverhalten

Eine weitere stark vereinfachende Grundannahme ist eine Homogenität des Materials. Für alle Elemente des gleichen Materials wurden auch die exakt gleichen Ausgangsparameter angesetzt. Eine Materialstreuung zum Beispiel über die Fuge wurde nicht berücksichtigt.

Die Materialdaten für den Stein wurden durch Prüfungen eines historischen Ziegels ermittelt. Dagegen stammen die ermittelten Mörtelraten von einem Reparaturmörtel aus Hochbrandgips.

Die angenommenen Parameter für den Stein sind aus Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Annahme der Steinparameter

Material	Dichte [g/cm ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Querdehnzahl
Allgemein	1,8	-	-	5000	0,2
Allgemein	1,8	10	1,0	5000	0,2

Für die Zugfestigkeit der Mörtel wurde angenommen, dass diese 2/3 der Biegezugfestigkeit beträgt. Die ermittelten Daten sind aus Tabelle 9 ersichtlich.

Tabelle 9: Mörtelraten zweier Hochbrandgipse unter nassen und trockenen Bedingungen

Material	Dichte [g/cm ³]	Druck- festigkeit [N/mm ²]	Biegezug- festigkeit [N/mm ²]	Zug- festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Querdehnzahl
Mörtel trocken	1,21	6,1	2,8	1,87	4600	0,2
Mörtel nass	1,69	2,8	1,1	0,73	3600	0,2

6.1.4 Lasten

Das Quellen wurde als Wärmedehnung simuliert. Mit

- $\alpha = 0,001 \text{ K}^{-1}$
- $\Delta T = 1 \text{ K}$

ergibt sich $\varepsilon_{cr} = 0,001 \cdot 1 \text{ °K} = 1,0 \text{ Promille}$.

Es wurde angenommen, dass sich lediglich der Fugenmörtel ausdehnt.

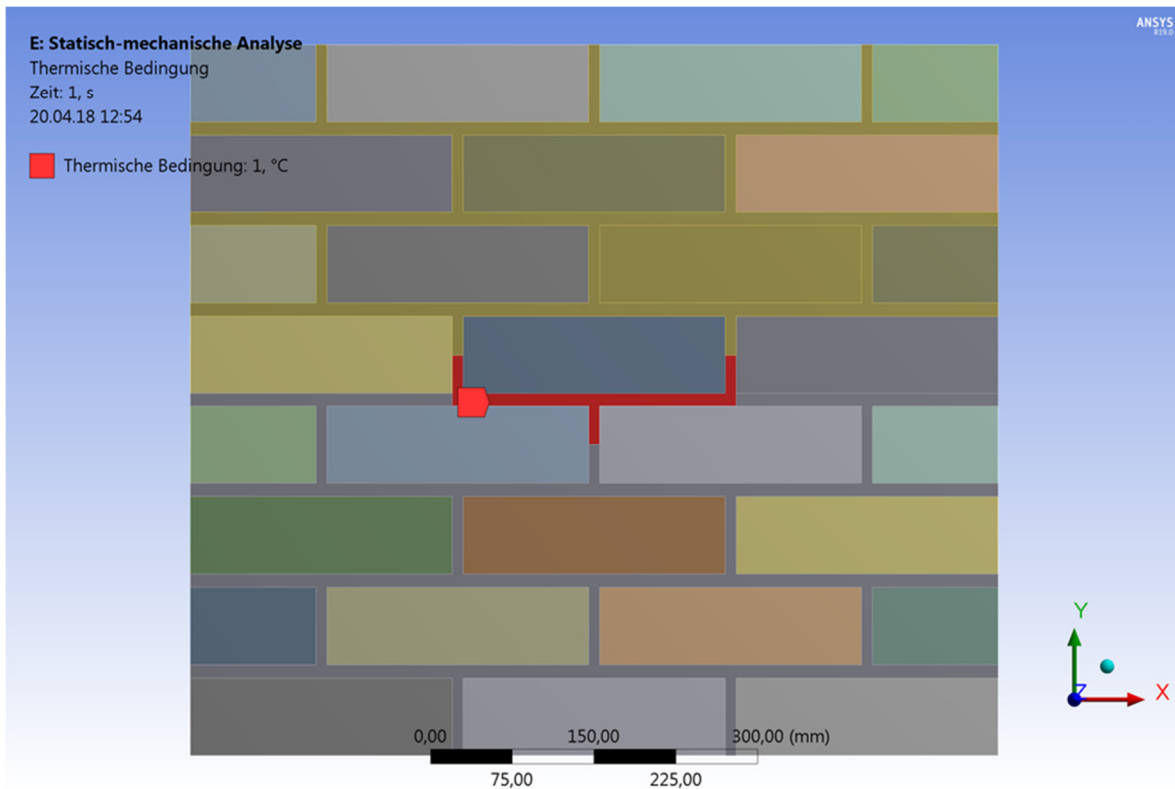


Bild 80 Wandausschnitt mit Last

6.2 Ergebnisse der Simulation

6.2.1 Elastisches System (Kleinmodell)

Die Ergebnisse der Simulation am Kleinmodell für ein elastisches System sind aus Bild 81 bis Bild 84 ersichtlich.

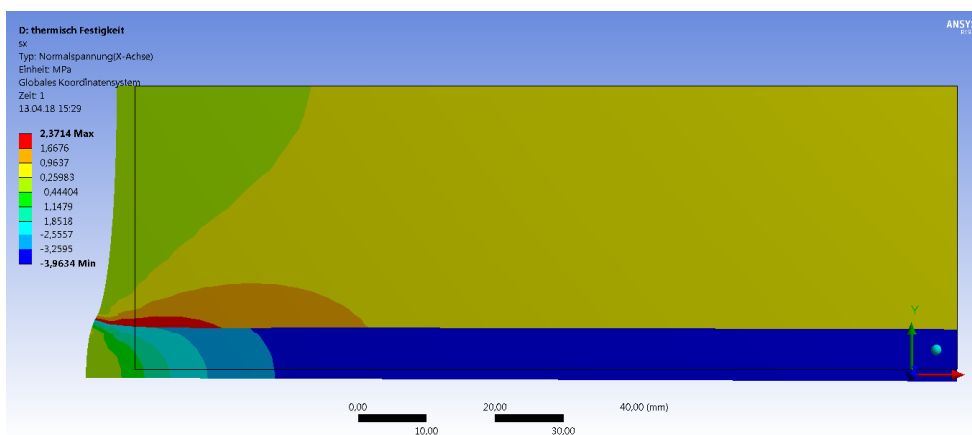


Bild 81 Spannungen in x-Richtung

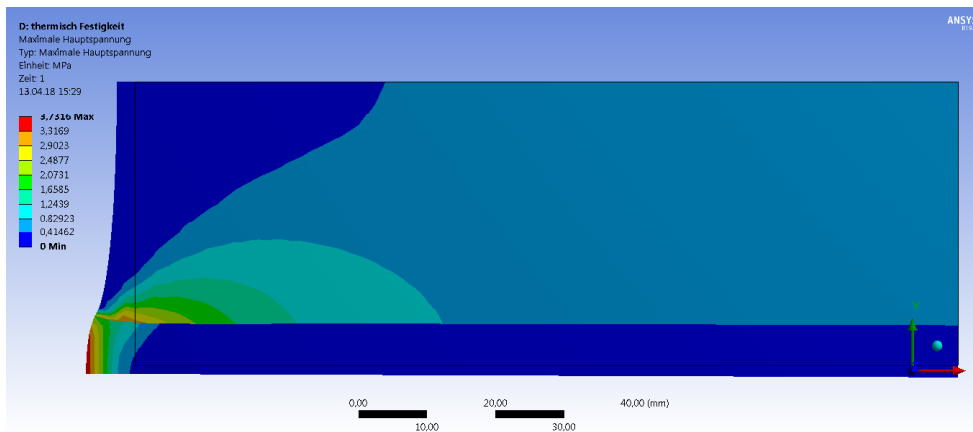


Bild 82 *Hauptzugspannungen*

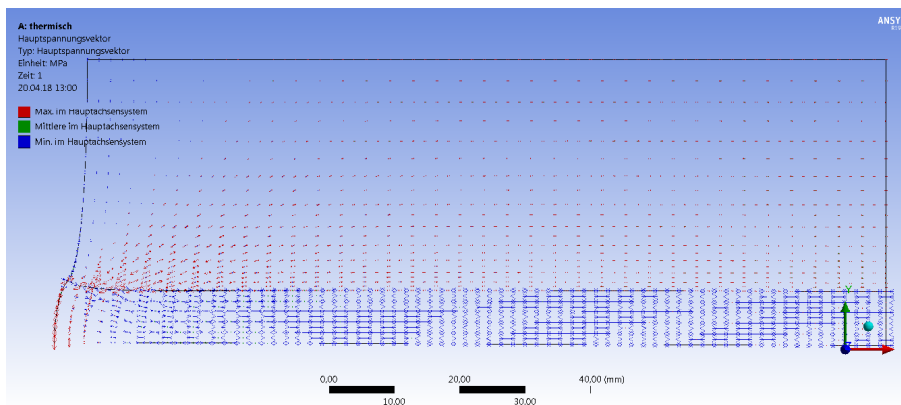


Bild 83 *Spannungstrajektorien*

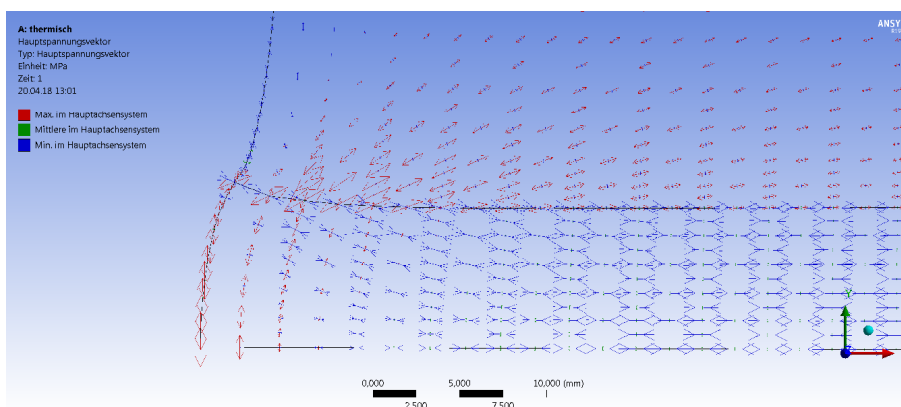


Bild 84 *Spannungstrajektorien Ausschnitt aus Bild 83*

Erwartungsgemäß liegen die höchsten Spannungen an der Oberfläche des Materials, es tritt eine Verformung ein. Bei Annahme eines rein elastischen Verhaltens liegen die auftretenden

Hauptzugspannungen sowohl über der Zugfestigkeit des Mörtels als auch über der des Steins.

6.2.2 Mörtel 2 trocken

Zunächst wurde ausschließlich der trockene Mörtel 2 mit Zugfestigkeit simuliert (Bild 85 bis Bild 88).

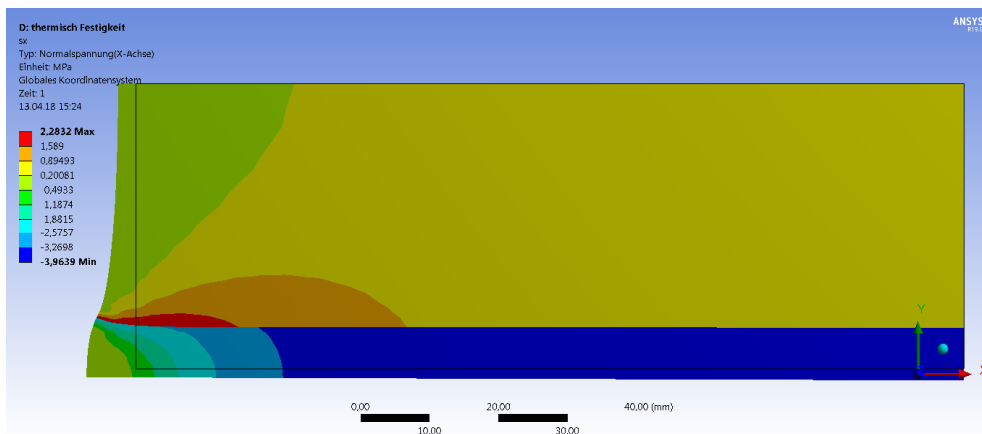


Bild 85 *Spannungen in x-Richtung*

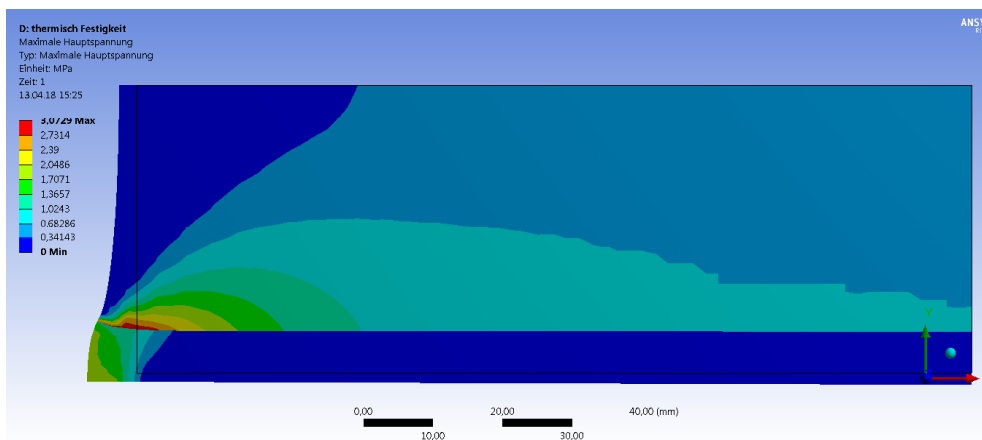


Bild 86 *Hauptzugspannungen*

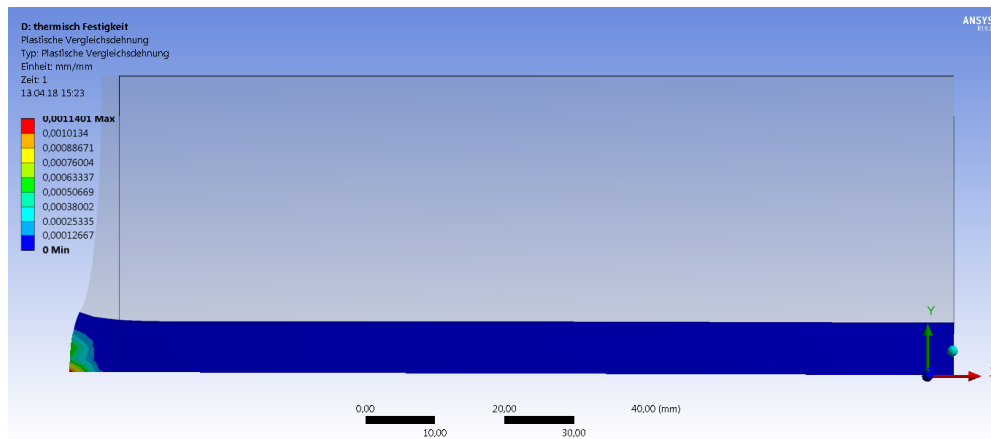


Bild 87 *Plastische Vergleichsdehnungen*

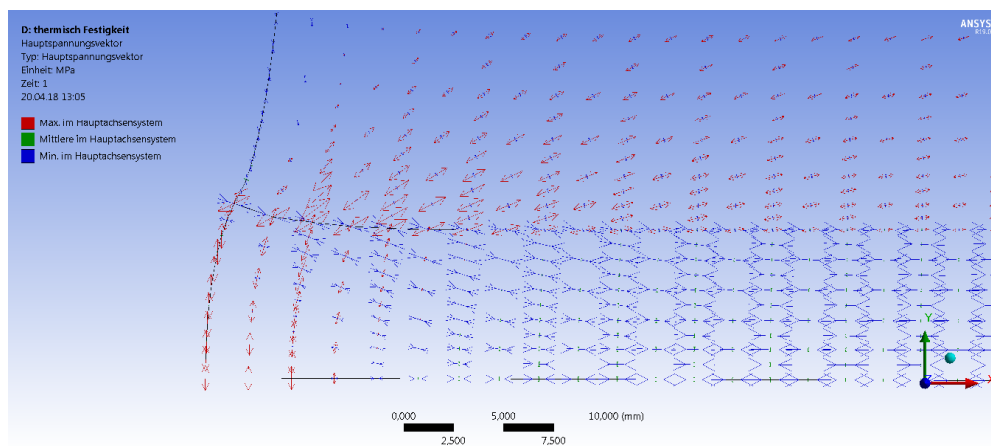


Bild 88 *Spannungstrajektorien*

Gegenüber dem System mit der Annahme eines elastischen Mörtels hat sich die auftretende Hauptzugspannung im Stein um $0,7 \text{ N/mm}^2$ verringert.

Auf Grund der begrenzten Zugspannung im Mörtel sind die vertikalen Zugspannungen am Fugenrand geringer als im Bild 82.

Anschließend erfolgte die Simulation des Mörtels und Steins mit Zugfestigkeit (Bild 89 bis Bild 91). Die Zugfestigkeit des Steines beträgt hier $1,0 \text{ N/mm}^2$.

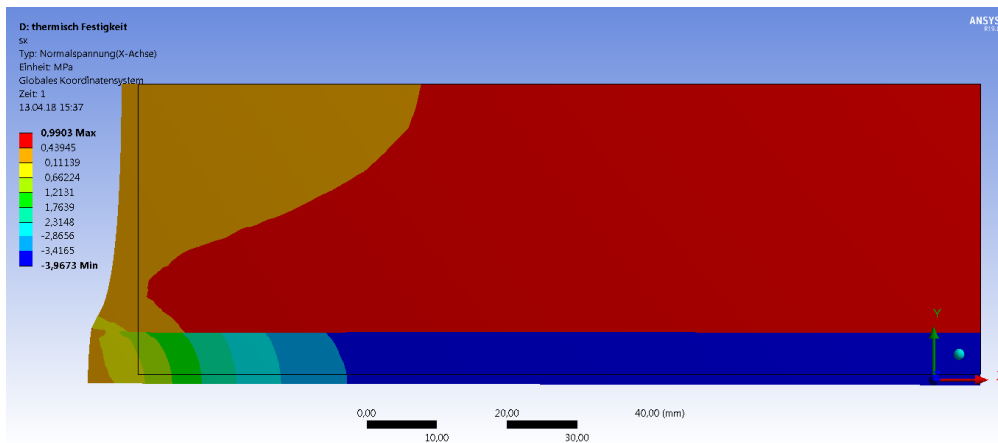


Bild 89 *Spannungen in x-Richtung*

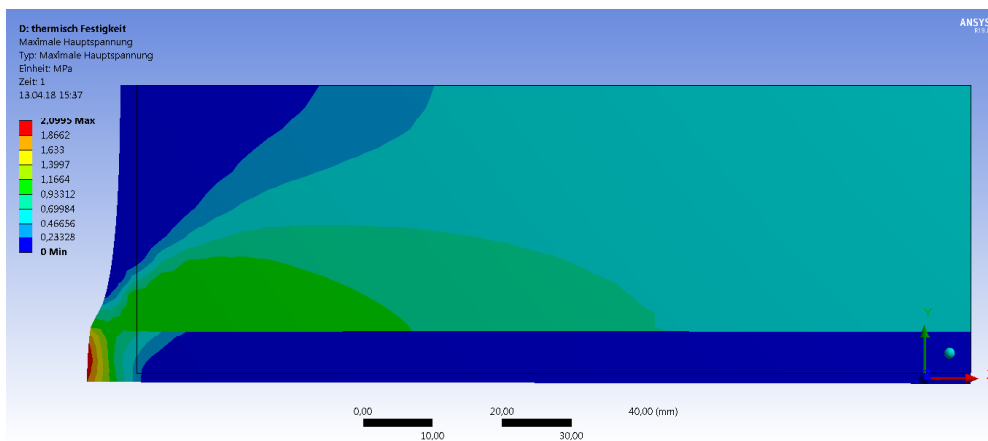


Bild 90 *Hauptzugspannungen*

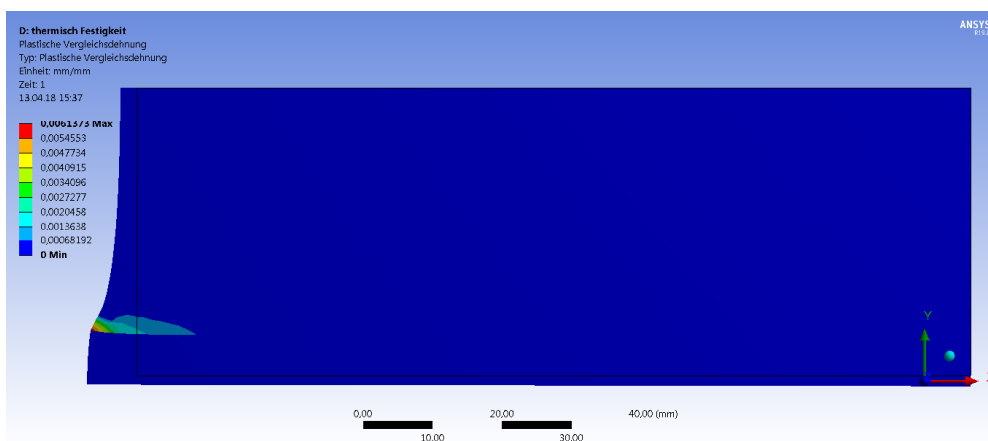


Bild 91 *Plastische Vergleichsdehnungen*

Gegenüber dem elastischen Mörtel hat sich die Hauptzugspannung im Stein um $1,7 \text{ N/mm}^2$ verringert. Die Hauptzugspannungen im Stein liegen mit $0,9 \text{ N/mm}^2$ knapp unter Zugfestigkeit von $1,0 \text{ N/mm}^2$. Mit einer maximalen Hauptzugspannung von $2,1 \text{ N/mm}^2$ im Mörtel liegt diese Spannung über der ermittelten Zugfestigkeit des trockenen Mörtels von $1,87 \text{ N/mm}^2$ und kann somit zu einem Versagen des Mörtels führen. Deutlich verstärkt wird dieses Problem bei einer Durchfeuchtung des Mörtels mit einem Abfall der Zugfestigkeit auf $0,73 \text{ N/mm}^2$.

6.2.3 Wandausschnitt

Bild 92 zeigt die Gesamtverformung des angenommenen Wandausschnittes bei der beschriebenen Längsverformung des Mörtels. Aus Bild 93 bis Bild 95 sind die berechneten auftretenden Spannungen im Mauerwerk ersichtlich. In sehr kleinen Eckbereichen wird die Zugfestigkeit des Steins deutlich überschritten.

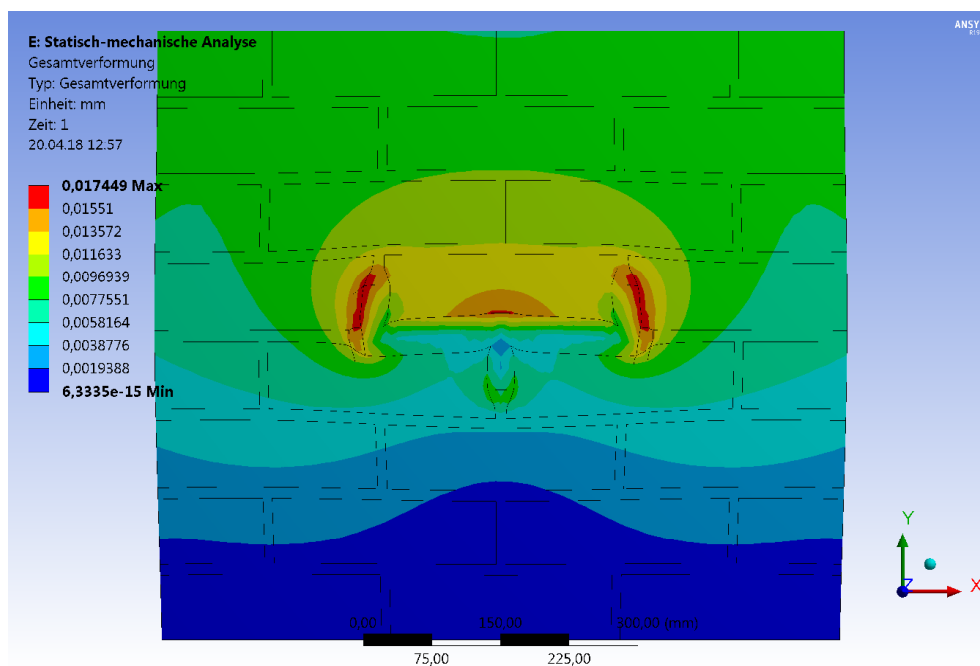


Bild 92 Gesamtverformung

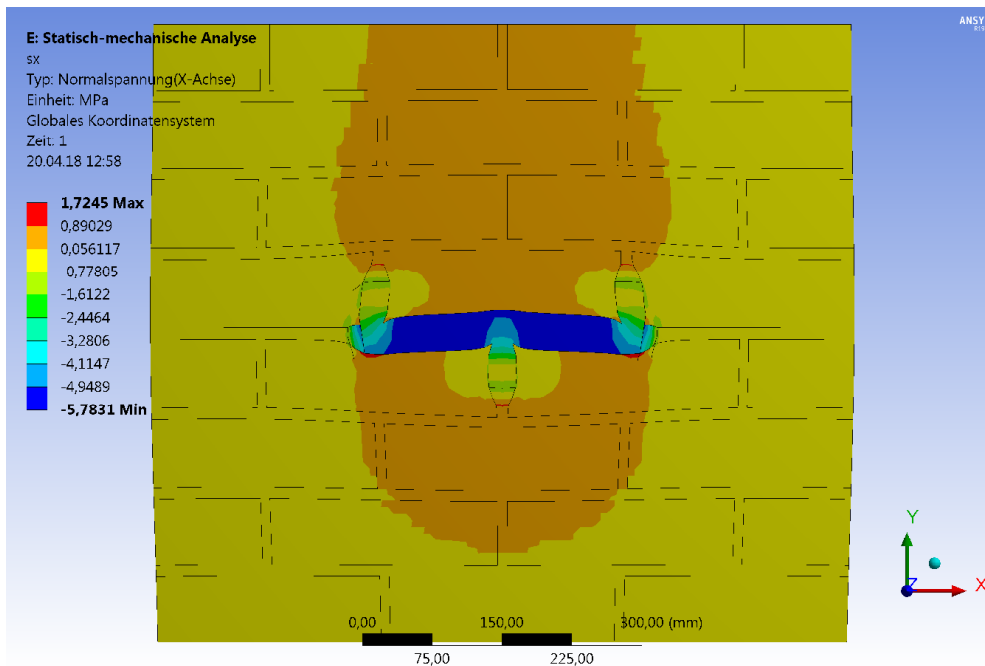


Bild 93 *Spannungen in x-Richtung*

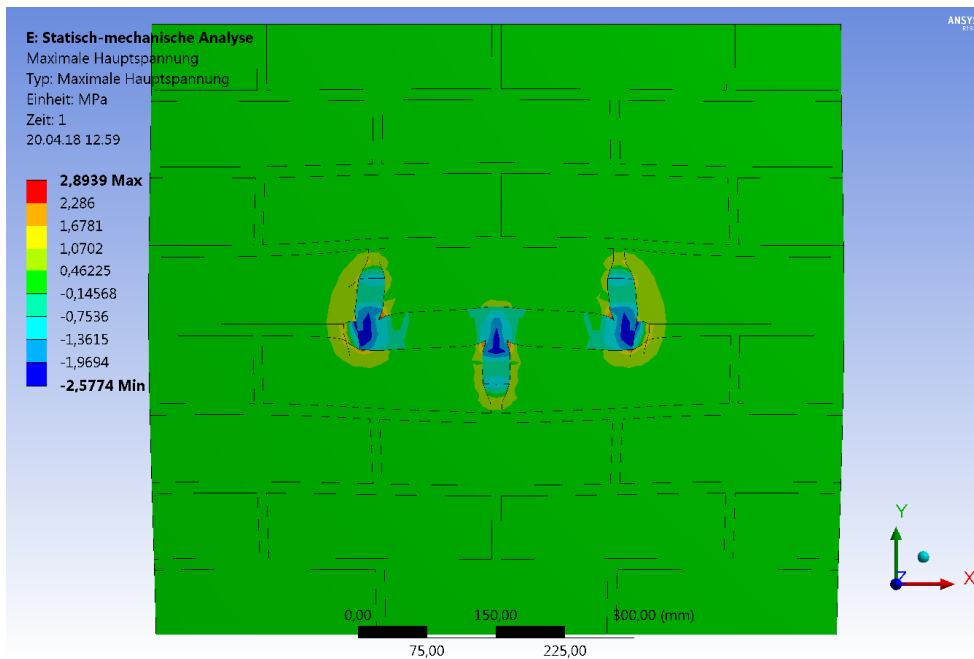


Bild 94 *Hauptzugspannungen*

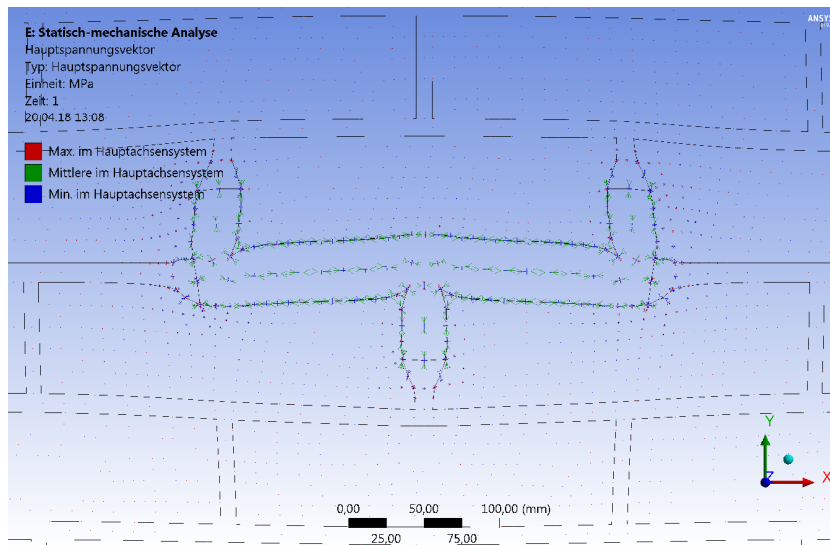


Bild 95 Spannungstrajektorien

6.2.4 Mauerwerksdruckfestigkeit

Für den Mörtel wurden numerisch die Mauerwerksdruckfestigkeiten ermittelt. Hierbei sind einige Varianten /Einflussfaktoren untersucht worden.

A Ideal plastisches Verhalten im Druckbereich

Für die zu ermittelnde Mauerwerksdruckfestigkeit wurde zweidimensional mit ebenem Spannungszustand gerechnet. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 10 ersichtlich.

Tabelle 10: Mauerwerksdruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtezustand

Mörtel	MW-Druckfestigkeit [N/mm ²]	Bemerkung
Stein (10 N/mm ²)		
Mörtel trocken (6,1 N/mm ²)	7,42	
Mörtel feucht ohne Quellen (2,8 N/mm ²)	3,86	Nur die verringerte Festigkeit wird betrachtet
Mörtel feucht mit Quellen (2,8 N/mm ²)	3,86	0,5 % Quellen

Es wird deutlich, dass gemäß der klassischen Lehre, die Druckfestigkeit des Mauerwerks über der des Mörtels liegt. Dies resultiert aus der Querdehnungsbehinderung des Mörtels durch den Stein.

B Ebener Dehnungszustand

Beim ebenen Dehnungszustand ergibt sich durch die Querdehnungsbehinderung des Mörtels eine Bruchspannung nahe der Steifigkeit.

C Entfestigung der Druckfestigkeit

Bei den Ergebnissen der folgenden Tabelle wurde auch die Druckfestigkeit entfestigt. Bei der Druckentfestigung wurde von 3,5‰ plastischer Dehnung bei vollständiger Entfestigung ausgegangen.

Tabelle 11: Mauerwerksdruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtezustand (Druckentfestigung)

Mörtel	MW-Druckfestigkeit [N/mm ²]	Bemerkung
Stein (10 N/mm ²)		
Mörtel trocken (6,1 N/mm ²)	6,180	
Mörtel feucht ohne Quellen (2,8 N/mm ²)	2,939	Nur die verringerte Festigkeit wird betrachtet
Mörtel feucht mit Quellen (2,8 N/mm ²)	3,186	0,5 ‰ Quellen

6.3 Einordnung der Simulation

Die in sehr begrenztem Umfang durchgeführte Simulation zu einer Längenänderung infolge Treibmineralbildung von 1 mm/m führte zu dem Ergebnis, dass die auftretenden Spannungen die Eigenfestigkeiten des Materials überschreiten können. Dies ist erwartungsgemäß von den Grundannahmen und dem gewählten System abhängig. Extrem wichtig sind der Feuchtezustand und die bekanntermaßen davon abhängende Zugfestigkeit des Gipsmörtels. Ausdrücklich nicht beachtet wurde der Festigkeitsverlust der Mörtelmatrix infolge Treibmineralbildung. Die ermittelte Mauerwerksdruckfestigkeit ändert sich bei einer Durchfeuchtung des Mörtels analog zu dessen Festigkeitsänderung.

Die betrachtete Längenänderung von 1 mm/m scheint einen Grenzzustand darzustellen. Bei dieser Aussage handelt es sich um das Ergebnis erster Tastrechnungen. Die genauere numerische Untersuchung war nicht Gegenstand dieses Projektes. Derartige Fragestellungen werden derzeit in einer Promotionsarbeit an der Jade Hochschule in Oldenburg bearbeitet.

7 Modellobjekte

7.1 Modellmauer auf dem Versuchsgelände der TU Dresden

Im Oktober 2018 wurde auf dem Versuchsgelände der TU Dresden eine zweischalige Mauer errichtet, zwischen deren Schalen Rohgipsgesteinsbrocken eingefüllt werden. Diese sind mit dem entwickelten Schaumgipsmörtel im November 2018 verfüllt worden.



Bild 96 *Mehrschalige Modellmauer zum Verfüllen mit dem im Projekt entwickelten Schaummörtel*

Verwendete Materialien:

Mauersteine – Sächsischer Granit

Mauermörtel – Hochbrandgips Keuper aus der Ziegelei Hundisburg

Verfüllmaterial - Rohgipsbruch

Injektionsmörtel im Projekt entwickelter Schaummörtel auf der Basis von
Alpha- und Betahalbhydrat

Die Mauer wird über die Projektlaufzeit hinaus weiterhin beobachtet.

7.2 Schloss Steinort

Erste Versuche zur Optimierung der Injektionstechnologie im historischen Mauerwerk konnten am Schloss Steinort durchgeführt werden.

Das Objekt, Schloss Steinort, wurde unter Einbeziehung von Vorgängerbauten im Wesentlichen 1689 – 1693, in barockem Stil, errichtet und in der Folgezeit mehrfach überformt. Bis 1944 war das Schloss im Besitz der Familie von Lehndorff. Nach der Beteiligung von Heinrich Graf von Lehndorff am Attentat auf Hitler am 20. Juli 1944 wurde das Schloss enteignet und nach dem Krieg als Verwaltungssitz eines staatlichen Landwirtschaftsbetriebs weitergeführt. Heute ist das Gebäude in schlechtem, ruinösem Zustand. Zwei Gründe sind für den heutigen Zustand maßgeblich verantwortlich zu machen. Zum einen der durch Klimawandel erhöhte Niederschlag, der die vorgesehenen Entwässerungsanlagen überforderte. Zum anderen aber auch der fehlende Bauunterhalt und die Vernachlässigung des Gebäudekomplexes nach Beendigung der landwirtschaftlichen Nutzung.

Im Bild 97 ist das Schloss von der Parkseite aus zu sehen.



Bild 97 *Schloss Steinort*

Das Schloss Steinort ist als massiver Mauerwerksbau ausgeführt. Das Mauerwerk besteht im Wesentlichen aus Mischmauerwerk und Ziegelmauerwerk.

Mischmauerwerk

Das Mischmauerwerk ist zum größten Teil in Lehmörtel versetzt. Als Steine wurden Feldsteine, Bruchsteine und Ziegelbruch verwendet. Dieser Mauerwerktyp wurde zum Aufbau der Fundamente und der Kellermauern verwendet. Da das Mauerwerk nicht gegen das Erdreich abgedichtet ist, wurden große Bereiche durch eindringendes Wasser geschädigt. Hauptsächliche Schäden stellen ausgewaschene und aufgeweichte Fugen- und Mauermörtel dar. Teilweise kam es zu Setzungen, Ausbrüchen und Verformungen. Im Bild 98 ist ein solches Mauerwerk im Keller des Nordturmes zu sehen.

Ziegelmauerwerk

Das Ziegelmauerwerk besteht aus in Kalkmörtel gesetzten Vollziegeln. Durch Setzungen kam es zu unterschiedlichen Rissformen. Im Bild 101 ist auf der Putzfläche ein Riss zu sehen. Nach Abnahme des Putzes in dem Bereich wurde festgestellt, dass es sich um einen Treppenriss handelt, der durch den gesamten Mauerwerksquerschnitt verläuft. Entstanden ist der Riss durch Ablösen der rechts anschließenden Nordwand. Diese neigt sich durch Setzungen nach außen und öffnete dadurch den Riss.

Schäden

In Schloss Steinort sind vor allem die Kellerfundamente und –mauern durch Starkregen und fehlende Wasserableitung stark in Mitleidenschaft gezogen. Die Fugen, des in Lehm gesetzten Natursteinmauerwerks, sind oftmals bis tief in den Mauerquerschnitt ausgeschwemmt und hohl. Im Bild 98 links ist eine Kellerwand nach der Reinigung und dem Entfernen der losen Materialien zu sehen.



Bild 98 *links die Kellerwand aus Feldstein in Lehm versetzt mit ausgewaschenen Fugen, rechts die Ausblaspistole mit Gummischlauch und Lanze*

Für Injektionsarbeiten müssen alle losen Partikel, wie restlicher Fugenmörtel, Steine und eingeschwemmter Lehm aus den Fugen entfernt werden. Die Steine sind sorgfältig zu reinigen, damit der neue Fugenmörtel und der anschließend eingesetzte Injektionsmörtel anhaften können. Als Werkzeuge eignen sich dazu sehr gut Spitzkellen, wie sie auch von Archäologen zum Freilegen verwendet werden und steife Pinsel oder Bürsten. Nachdem die Steinoberflächen gegebenenfalls noch gewaschen werden, sind zum Schluss noch die Fugen mit einem starken Kompressor und einer lanzenförmigen Spitze auszublasen. Im Bild 99 rechts ist eine solche Ausblaspistole zu sehen. Diese wird vom Projektpartner DESOI in ihrem Bestand geführt und eignet sich sehr gut auch zum tiefgründigen Ausblasen der Fugen.

Nach diesen Vorarbeiten, die durchaus längere Zeit in Anspruch nehmen können, ist zum einen das Ausmaß der Schäden erstmals gänzlich zu überblicken und zum anderen ist die Mauer nun vorbereitet zum Verfugen. In diesem Fall erkennt man, dass in der Mauer nicht nur tiefgründig ausgewaschene Fugen vorliegen, sondern auch, dass sich zwischen Mauer und Gewölbe ein breiter Riss aufgetan hat.

Der nächste Schritt ist das gewissenhafte Ausfüllen der Fugen und Risse. Dabei ist darauf zu achten, dass das Erscheinungsbild des historischen Mauerwerks erhalten bleibt. Die breiten Fugen sind dementsprechend mit kleineren Steinen auszuwickern und nicht nur mit Mörtel zuzuwerfen.

Im 96 sieht man links, das fertig verfugte Mauerwerk mit eingelassenen, blauen Kunststoffschläuchen (durch rote Kreise im Bild 99 kenntlich gemacht). Rechts einer der Kunststoffschläuche im Detail. Im Gegensatz zu Injektionen in Fels oder Mauerwerk aus Beton, sind Injektionen in historisches Mauerwerk mit geringeren Drücken auszuführen. Ein Grund ist die geringere Festigkeit des historischen Mauerwerks. Diese geringere Festigkeit im Mörtel führt auch dazu, dass übliche Ankersysteme aus der Injektionstechnologie nicht verwendet werden können. Der Einsatz von Schlag-, Keil- oder Schraubpackern scheitert an der oftmals mürben Konsistenz des Fugenmörtels.

Aus diesem Grund wurde das hier vorgestellte Verfahren entwickelt. Die, bei der ohnehin notwendigen Fugensanierung, eingemörtelten Röhren bilden den Zugang zu dem nun nach außen geschlossenen Kavernensystem. Durch die variable Länge der Schläuche können auch tiefe Bereiche gut erreicht werden.



Bild 99 Links die mit Kalkmörtel verfugte Kellerwand aus Lesesteinen, mit den blauen Schläuchen (in den roten Kreisen), rechts die blauen Schläuche (1) und der dünnere Injektionsschlauch mit Schnellkupplungszange von DESOI (2)

Die eingemörtelten Schläuche lassen sich aus dem anstehenden Mörtel leicht herausziehen. Es bleibt ein rundes Loch mit dem Außendurchmesser des Schlauches –etwa 30 mm– bestehen. Durch dieses wird anschließend mit einem dünneren Schlauch das Verpressgut eingeleitet. Das vom Projektpartner DESOI angebotene System eines glatten, in der Länge

leicht kürzbaren Schlauches mit einer Kupplung hat sich für die Verpressarbeiten sehr gut bewährt. Die transparenten Schläuche (Bild 100, rechtes Bild (2)) werden mit Werg⁵ in die Löcher im Fugmörtel fixiert. Der Hanf hat den Vorteil, dass er Luft entweichen lässt und trotzdem das Verpressgut zurückhält. Nachdem alle Öffnungen mit Kupplungsschläuchen versehen sind, kann das Verpressen des Wandabschnittes begonnen werden. Obwohl die Bedienung der Pumpe und die Anschlüsse an die Kupplungsstücke von einer Person zu bewältigen wären, ist es auf alle Fälle besser zu zweit zu sein. Je nach Mauerwerk ist es sogar angeraten, dass eine dritte Person das Mauerwerk in den anliegenden Räumen kontrolliert. Durch den sehr fließfähig eingestellten Injektionsleim kommt es immer wieder vor, dass an völlig unerwarteter Stelle, oft auch mehrere Meter entfernt in einem anderen Raum, Injektionsmörtel austritt. In einem solchen Fall muss der Riss oder die kleine Öffnung sofort geschlossen werden. Dafür hat sich ebenfalls Hanf als Notfalllösung bewährt.



Bild 100 Links die mit Kalkmörtel verfugte Kellerwand aus Lesesteinen, mit den blauen Schläuchen (in den roten Kreisen), rechts die blauen Schläuche (1) und der dünnere Injektionsschlauch mit Schnellkupplungszange von DESOI (2)

Bild 100 zeigt einen solchen notfallmäßigen Einsatz. An den Spuren des ausfließenden, weißen Injektionsgutes erkennt man auch, wie flüssig die Suspension ist. Wenn diese Öffnungen nicht sorgfältig verschlossen werden, dann läuft ein Großteil des Verpressgutes wieder aus der Wand. Die hier beschriebenen Maßnahmen sind demnach zwingend erforderlich und verlangen nach einem eingespielten Team.

Verpresst wird vom tiefsten Punkt an, aufsteigend. Die Öffnungen sind so in der Wand zu verteilen, dass die Abstände nicht zu groß sind. Ein Raster von etwa 50 – 80 cm zur nächsten Öffnung hat sich als praktikabel herausgestellt. Der beim Verpressen aufgebaute Druck muss laufend kontrolliert werden. Am besten ist es, wenn direkt am Kugelhahn der Verpresszange auch ein Manometer angebracht ist. Der Druck sollte im historischen Mauerwerk 1 – 1,5 bar nicht überschreiten. Ebenso ist darauf zu achten, dass die Verpress-

⁵ Werg- Hanffasern niederer Qualität

höhe nicht zu hoch wird. In der Praxis haben sich Verpresshöhen von 50 – 80 cm, in Ausnahmefällen, wenn der Riss sehr wenig verzweigt und das Mauerwerk solide ist, auch 100 cm, bewährt. Danach sollte das Injektionsgut Zeit zum Ansteifen und Aushärten bekommen. Der Verpressvorgang wird in der nächsten Höhe erst einen oder zwei Tag später fortgesetzt.

Im Folgenden wird das Vorgehen an einem Treppenriss demonstriert (Bild 101). Diese Rissform ist vor allem in Ziegelmauerwerk häufig zu beobachten. Durch Absenken einer Stirnwand wird die Verzahnung innerhalb des Ziegelverbands auseinander gerissen.

Zunächst wird der Putz sorgfältig zurückgearbeitet, bis das Ausmaß des Schadens gut sichtbar ist. In diesem Fall zeigt sich ein mehrfach verzweigter Treppenriss. Die Stoßfugen der Ziegel sind meist leicht auszuräumen, die Lagerfugen sind in der Regel noch fest. In diesem Umstand liegt auch die Schwierigkeit des Verpressens. Durch die überwiegend horizontale Bewegung „gleitet“ die Mauer auf den Lagerfugen. Die Setzfugen werden durch die Bewegung geöffnet. Beim Verpressen stellen die noch intakten Lagerfugen eine Barriere dar. Entweder es wird versucht die Lagerfugen ebenfalls zu durchstoßen oder es können im Innern der Mauer Wegsamkeiten durch die Lagerfugen festgestellt werden oder es müsste jede Ziegellage für sich verpresst werden. Dies gilt es im Hinblick auf eine kraftschlüssige Verfüllung der Hohlräume auf alle Fälle zu kontrollieren.

Ansonsten ist das Vorgehen wieder vergleichbar mit dem vorher beschriebenen. Zunächst werden die Fugen manuell von losem Mörtel befreit und ausgeräumt. Dann werden sie mit Druckluft ausgeblasen und im nächsten Schritt werden die Fugen mit einem, dem originalen Mauermörtel angeglichenen Mörtel, neu verfügt. Packer können bei diesem Schließen der Fugen gleich mit eingemörtel werden.



Bild 101 Links die Wand mit Riss in Originalzustand, rechts nach dem Öffnen des

Verputzes und dem Beräumen der offenen Fugen

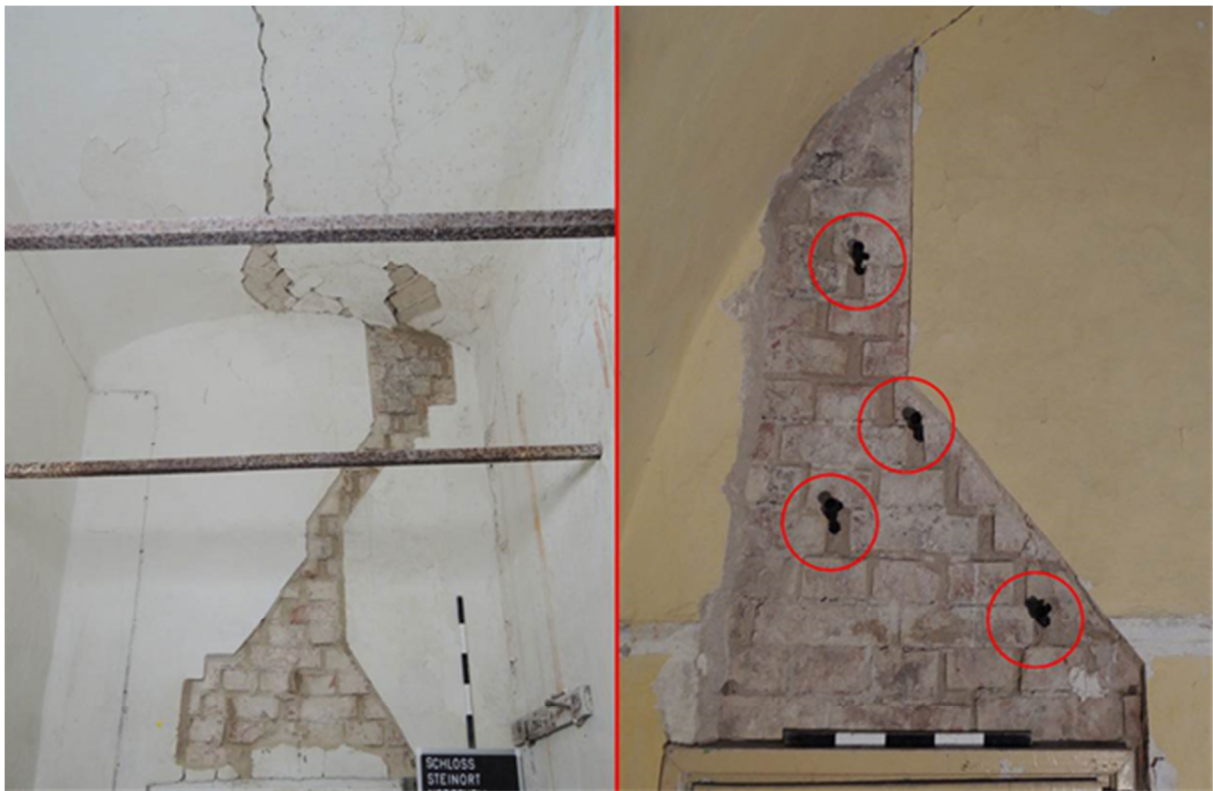


Bild 102 *Links der mit Kalkmörtel verschlossene Treppenriss der vorhergehenden Bilder. Rechts die verschlossenen Fugen mit eingemauerten Packern (in den roten Kreisen) auf der anderen Wandseite.*

Im Bild 102 ist links der mit Kalkmörtel verschlossene Treppenriss zu sehen, rechts der Treppenriss auf der anderen Wandseite mit den eingemörtelten Packern (markiert durch rote Kreise). Da die Mauer nur etwa 70 cm Tiefe aufweist und die Hohlräume gut zugänglich waren, war es ausreichend von einer Seite zu verpressen. Der Abstand der Packer ist je nach Anforderung zwischen 30 und 80 cm. Selbst bei diesem verhältnismäßig kleinen Mauerstück stellte es sich heraus, dass unbedingt zu zweit verpresst werden musste. Gerade feinste Risse im Ziegelmauerwerk waren sofort mit Hanf zu verstopfen. Statt der Packer hätte man auch die zuvor beschriebene Methode mit den reversiblen Schläuchen einsetzen können. Die Packer müssen nach dem Verfüllen eben mit der Wand abgeschnitten werden. Es verbleibt ein kleiner Rest in der Wand.

Grundsätzlich kamen bei den Verpressarbeiten in Schloss Steinort zwei Pumpen zum Einsatz. Im Bild 103 ist links die Handhebelkolbenpumpe zu sehen, rechts die Schneckenpumpe. Für kleinere Mauerabschnitte oder auch für Verpressarbeiten, die vom Gerüst aus zu bewerkstelligen waren, eine Handhebelkolbenpumpe und für größere Volumen eine elektrisch betriebene Schneckenpumpe. Beide wurden vom Projektpartner DESOI zur Verfügung gestellt. Und beide haben sich für die Arbeiten am historischen Mauerwerk als gut, zuverlässig und durchdacht herausgestellt.



Bild 103 Links Handhebelkolbenpumpe, rechts elektrische Schneckenpumpe.

Wichtig sind bei beiden Pumpen die Siebvorsätze am Einsaugschlauch und das Manometer in direkter Nähe zum Schnellspannzangenverschluss. Mit der Handhebelpumpe ließ sich erwartungsgemäß feinfühlig pumpen. Während der Arbeiten mit der Schneckenpumpe muss das Manometer sehr genau beobachtet werden. Wenn es irgendwo im Porensystem zu Verstopfungen kommt steigt der Druck plötzlich an. Dann muss die Ursache für diesen Druckanstieg schnellstens beseitigt werden.

8 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes war es, Technologien und Materialien für Injektionen in sulfathaltiges Mauerwerk zu entwickeln. Während der Projektbearbeitung wurde sich zunächst auf die Entwicklung der Injektionstechnologien konzentriert. In einem weiteren Schritt wurden vorhandene Prüfverfahren zur Sulfatbeständigkeit aufgegriffen und ein Prüfregime für das Projekt festgelegt. Mit diesem Prüfregime konnten Materialkombinationen auf unterschiedlicher Bindemittelbasis getestet werden. In der Folge wurde sich auf eine Materialkombination aus calciumsulfathaltigen Bindemittel und kalkhaltigem Füllstoff festgelegt.

8.1 Technologien zum Verpressen von historischem Mauerwerk

Zur statischen Ertüchtigung von historischem Mauerwerk werden seit vielen Jahrzehnten Injektionen zum Verfüllen von Rissen, Hohlräumen und Gefügeveränderungen eingesetzt. Durch diese Maßnahmen soll die ursprüngliche Tragfähigkeit wiederhergestellt oder verbessert werden. Ausführlich wurde darüber in [93] darüber berichtet. Für sulfathaltiges Mauerwerk gelten dabei besondere Anforderungen.

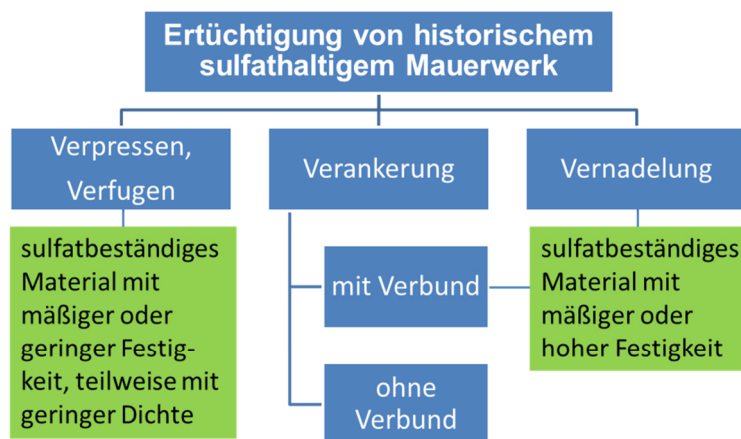


Bild 104 *Materialanforderungen für die Ertüchtigung von sulfathaltigem historischem Mauerwerk*

8.1.1 Verfüllen von Hohlräumen

Sollen im Mauerwerk Fehlstellen verfüllt werden, wird in der Regel ein mineralisches Injektionsgut eingesetzt. Dieses muss entsprechend jeweiliger Volumina der Hohlräume gewählt werden. Die Injektionsmörtel sollten in Bezug auf Dichte und E-Modul an das umgebende Mauerwerk angepasst sein. Oft besitzen sie jedoch eine hohe Dichte und können so das Mauerwerk zusätzlich belasten. Deshalb empfiehlt sich in vielen Fällen der Einsatz von Injektionsschaummörteln. Somit wird die Masse des Bauwerks nur geringfügig verändert und der E-Modul kann an das umgebende Mauerwerk angepasst werden, es bleibt elastisch und ändert sein Gesamttragverhalten nicht. Das Porenvolumen des erhärteten Injektionsgutes bietet Schadsalzen in gewissen Grenzen Kristallisationsraum.

8.1.2 Herstellen des Kraftschlusses

Durch Verpressen von auf Druck beanspruchten Fugen und Fehlstellen im Mauerwerk kann die Tragfähigkeit im begrenzten Umfang angehoben werden (Druckkontakt über die verpresste Fläche). Risse entstehen dagegen durch Zugbeanspruchung und zu geringe Zugfestigkeit. Durch Injektionen können in gewissen Grenzen zwischen gesäuberten Rissflanken bestehende Hohlräume wieder kraftschlüssig verfüllt werden. Ab bestimmten Rissbreiten und -tiefen sollten Risse vernadelt oder vernäht werden.

8.1.3 Vernadeln und Verankern

Diese Bewehrungselemente können Zugkräfte übertragen. Die Kräfte vom umgebenden Mauerwerk müssen vom Mauerwerk in den Anker bzw. die Nadel und wieder zurück in das Bauwerk übertragen werden. Entsprechend wichtig sind die Verbünde:

- Anker - Injektionsgut und
- Injektionsgut - umgebendes Mauerwerk.

Dabei ist wichtig, dass die beiden Verbundflächen aufeinander abgestimmt und das erhärtete Verpressmaterial die Kräfte optimal übertragen kann. Dafür sind entsprechende Festigkeiten des Injektionsgutes (Ankermörtel) notwendig. Insbesondere beim sulfathaltigen Mauerwerk ist die Wahl eines geeigneten Ankermörtels extrem wichtig. Hier dürfen nicht nur physikalische Größen (Festigkeiten, E-Modul) sondern auch chemische Einflüsse und die Umgebungsbedingungen beachtet werden. Besonders muss auch der Korrosionsschutz der Nadeln und Anker beachtet werden. Im sulfatischen Milieu können Edelstahl-, Glasfaser-, Carbon- und Basaltanker zur Anwendung kommen.

8.1.4 Vorbereitung des Mauerwerks

Vor dem Beginn aller Injektionsarbeiten ist das Mauerwerk gründlich vorzubereiten. Zunächst müssen lose Teile und Schmutz von den Oberflächen und aus den Rissen sowie aus den Bohrlöchern entfernt werden. Ausbruchstellen müssen geschlossen werden. Dafür sollte möglichst Originalmaterial verwendet werden. Fugen müssen V-förmig ausgekratzt und neu verfügt werden. Die Fugen und Risse müssen so gefüllt sein, dass kein Verpressgut austreten kann. Im Mauerwerk müssen Entlüftungsöffnungen (Entlüftungspacker oder lediglich mit Werg verstopfte Fehlstellen) vorgesehen werden um die verdrängte Luft während des Verpressvorganges aus dem Mauerwerk zu entlassen.

Im nächsten Schritt müssen Packer in das Mauerwerk gesetzt werden. Entsprechend des Mauerwerkzustandes und Injektionszweckes (Rissverfüllung/ Hohlraumfüllung) variieren Ort, Lage, Art und Anzahl der Packer. Heute üblich sind Einschlag-, Schlauch-, Rohr- und Schraubpacker. Für das Verfüllen von größeren Hohlräumen im Mauerwerk haben sich innerhalb des Projektes Packerabstände von 30 bis 80 cm bewährt. Die Bohrungen für Packer- und Ankeröffnungen müssen ebenfalls mit angepasster Technik vorgenommen werden. Bei stark geschädigten, historisch wertvollen oder sehr filigranen Bauwerken sollte erschütterungsfrei gebohrt werden. Für sulfathaltiges Mauerwerk ist dies in [121] ebenfalls vorgeschrieben. Priorität hat immer der möglichst weitest gehende Erhalt der historischen Bausubstanz.

8.1.5 Verpresstechnik und Verpressvorgang

Das Verpressmaterial wird meist im Zwangsmischer gemischt. Soll ein Injektionsschaummörtel zur Anwendung kommen ist möglichst parallel ein stabiler Schaum mit geeigneter Technik herzustellen (Kap. 3.5). Anschließend können Mörtel und Schaum im

gewünschten volumetrischen Verhältnis mit einem Mörtelrührer kurz zu einem homogenen Schaummörtel gemischt werden.

Die Injektionen in Hohlräume im Mauerwerk und in Risse erfolgen mit sehr geringem Druck (maximal 1,5 bar). Sie werden aufsteigend von unten nach oben vorgenommen (Bild 105). Mit dem Aufsteigen des Injektionsgutes baut sich ein Druck auf, der das Verfüllen kleinster Fehlstellen ermöglicht. Insbesondere bei der Anwendung von Schaummörtel muss das Injektionsgut nach der Pumpe geprüft werden (Frischmörtelrohddichte, Herstellung von Mörtelprismen) um die Ausbildung der gewünschten Eigenschaften sicherzustellen. Für den Injektionsvorgang haben sich Kolben-, Schnecken- und Membranpumpen als geeignet erwiesen. Zur Ausbildung eines innigen Verbundes zwischen Verpressgut und dem umgebenden Mauerwerk kann eine Nachverpressung günstig sein.

Ankerbohrungen werden von innen heraus verpresst. Dazu wird der Verpressschlauch mit etwas Abstand am Anker angeheftet und mit ihm eingesetzt (Bild 116).

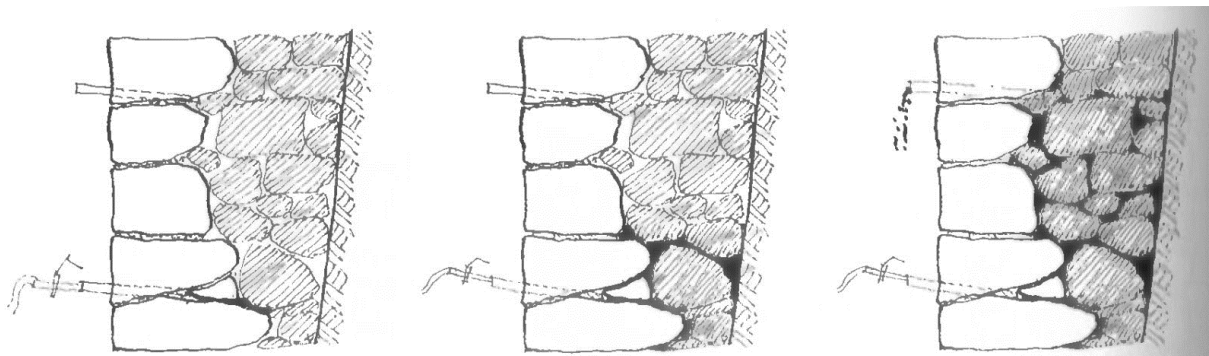


Bild 105 *Verpressvorgang im historischen Mauerwerk, links Beginn des Verpressvorganges, rechts Verpressgut steigt in den Hohlräumen des Mauerwerks, verdrängte Luft entweicht am nächsthöheren Packer, rechts das Verpressgut ist am nächsthöheren Packer angekommen und tritt dort aus, der Verpressvorgang wird jetzt gestoppt; aus [93]*

Die Kontrolle des Injektionserfolges sollte über eine Kontrolle der Festmörteleigenschaften erfolgen. Wichtig sind die Festmörtelrohddichte, die Druck- und Biegezugfestigkeit und das Schwindmaß. Die entsprechenden Materialproben sind während des Arbeitsvorganges nach dem Pumpendurchlauf zu entnehmen. Anschließend sind die Materialproben nach entsprechender Norm zu lagern und zu prüfen.

8.2 Injektionsmaterial

Entsprechend der Ziele des Forschungsantrages steht am Ende des Projektes ein zementfreies Injektionsmaterial zur Verfügung, welches im sulfathaltigen Mauerwerk unter verschiedenen Bedingungen eingesetzt werden kann.

Auf dem Weg zu diesem Ziel wurden mehrere Wege beschritten, von denen sich am Ende nur einer als zielführend erwies.

8.2.1 Prüfung des Sulfatwiderstandes von Mörteln und Simulation von Schädigungen

Für die Prüfung der Sulfatbeständigkeit von Mörteln existiert keine Normprüfung und damit verbunden sind auch keine Bewertungskriterien vorhanden (s. Kap. 4.1).

Nach Auswertung der Literatur wurde festgelegt, in Anlehnung an den Test nach Annstedt [5] bzw. Dreuse/ Zier [84] zu prüfen. Da kein Prüfkriterium existiert, stellt sich die Frage: **Ab welcher Längenänderung kommt es zu einer irreversiblen Schädigung des Mörtelgefüges?** Dreuse/ Zier teilen in verschiedene Schadensklassen in Bezug auf die Längenänderung ein. Ab 2 mm/ Längenänderung werden mit dem Auge sichtbare Schäden beschrieben. Innerhalb des Projektes wurde eine einfache Simulierung der entstehenden Spannungen bei einer „gedachten thermischen Dehnung“ von 1 mm/m vorgenommen. Dabei wurden teilweise beträchtliche Spannungen im Mauerwerk errechnet, welche beim Überschreiten der Zugfestigkeit zu Schäden führen können.

8.2.2 Prüfung von Fertigmörteln auf unterschiedlicher Bindemittelbasis

Es wurden Fertigmörtel auf der Basis von Romanzement, vorwiegend Luftkalk, vorwiegend latent-hydraulischen und vorwiegend puzzolanischen Materialien auf Sulfatbeständigkeit in Anlehnung an Anstett getestet (s. Kap. 4.3). Die Ergebnisse sind aus Bild 38 ersichtlich.

Romanzemente sind ebenso wie vorwiegend luftkalkgebundene Systeme für diesen Anwendungsfall nicht geeignet.

Die zwei vorwiegend puzzolanisch gebundenen Fertigmörtel (angeregt mit Zement) zeigten zwar geringere Längenänderungen als die vorgenannten Produkte, liegen aber über >2 mm/m und stellen somit keine Alternative dar.

Latent-hydraulische Systeme müssen ebenfalls für eine Hydratationsreaktion angeregt werden. Da dies meist mit Portlandzementklinker erfolgt, ist eine vollständige Portlandzementfreiheit nicht zwangsweise gewährleistet. Zwei Spezialmörtel auf dieser Basis schnitten im Test gut ab, das heißt es wurden Längenänderungen von <2 mm/m erreicht.

8.2.3 Bindemittelmischungen auf der Basis von Puzzolan

Weiter wurden fünfzehn Mischungen aus folgenden Materialien wurden untersucht (s. Tabelle 4):

- Bayrischen Trass,
- Rheinischen Trass,
- Metakaolin bzw.
- hochfeines Ca(OH)_2 zur Anregung (BET-Oberfläche > 35.000 cm^2/g).

Dabei sollte eine puzzolanische Reaktion mit Festigkeitsentwicklung zustande kommen. Leider konnte diese nicht festgestellt werden. Infolgedessen wurde dieser Ansatz verworfen.

8.2.4 Injektionsmaterial auf Calciumsulfatbasis mit Kalkanteil

Folgernd aus den vorangegangenen Ansätzen wurden zwei calciumsulfatbasierte Injektionsmörtel formuliert.

1. Hauptanteil Rostbandgips, Anteile von Alpha- und Beta-Halbhydrat, Kalk, Zusatzmittel
- 2. Hauptanteil Alpha- und Beta-Halbhydrat zu gleichen Teilen, Kalk, Zusatzmittel**

Nach Diskussion mit den Projektpartnern wurde sich auf die zweite Mischung konzentriert.

Besondere Beachtung bei der Prüfung der Mörtel wurde auf die unterschiedlichen Bedingungen im Mauerwerk gelegt. Es wurden folgende Prüf- und Lagerungsbedingungen festgelegt:

Lagerung A	Lagerung über Wasser über den gesamten Prüfzeitraum, Prüfung unter feuchten Bedingungen	soll ein vollständig feuchtes Mauerwerk nachahmen beziehungsweise ein Mauerwerk welches kaum Austrocknung zulässt
Lagerung B	Lagerung 7 d über Wasser, anschließend bei 20°C/65% rel. Feuchte, Prüfung ausgleichsfeucht	soll ein Mauerwerk mit Austrocknungspotential sehr trockenes Mauerwerk simulieren
Lagerung C	Lagerung über Wasser über den gesamten Prüfzeitraum, Prüfung nach Trocknung bei 35°C bis zur Massekonstanz	soll den Fall der Lagerung A darstellen und durch die anschließende Trocknung in Anlehnung an die Norm einen Vergleich zu anderen Produkten ermöglichen.

Für eine Bewertung des Materials unter verschiedenen Umgebungsbedingungen und zur Einschätzung der Carbonatisierung ist die Prüfung nach diesen drei Prüfregimes unabdingbar.

So konnte ein Ankermörtel mit Trockendruckfestigkeiten bis ca. 20 N/mm² und Nassdruckfestigkeiten bis ca. 11 N/mm² formuliert werden. Die Biegezugfestigkeit dieses Mörtels betrug nach Lagerung über Wasser ca. 3 N/mm² und nach Trockenlagerung bzw. Trocknung nach Norm 7-8 N/mm².

Für einen Injektionsmörtel mit geringerer Festigkeit wurde der Kalkanteil in der Mischung stufenweise erhöht. Günstige Ergebnisse wiesen die Mörtel mit 10 -20 M.-% Kalk auf.

Letztendlich muss der Injektionsmörtel je nach den Bedingungen im umgebenden Mauerwerk eingestellt werden. Dabei sind die Mauerwerksfeuchte und die Mauerwerksfestigkeit von zentraler Bedeutung.

8.2.5 Injektionsschaummörtel

Basierend auf oben genannter Rezeptierung wurde ein Schaummörtel formuliert. Mit dem Schaumbildner K1/K3 von der Firma Innotec konnte ein stabiler Schaum hergestellt und in den Frischmörtel eingebracht werden. Die Festigkeiten können durch entsprechende Mörtel:Schaum-Verhältnisse, im getesteten Fall 1:1; 1:0,8 oder 1:0,5 an den jeweiligen Verwendungszweck angepasst werden. Die daraus resultierende Rohdichte bedingt die sich einstellende Festigkeit. Günstig erscheinen Mischungen von 1:0,8 und 1:0,5. Damit konnten Festigkeiten nach 28d von 5 N/mm² und größer bei Einstellung einer Rohdichte (trocken) von ca. 1 g/cm³ erreicht werden.

9 Instandsetzung von historisch wertvollem, gipshaltigen Mauerwerk durch Injektionen - Aussagen und Hinweise für die Praxis

9.1 Notwendigkeit und Ziel

Historisches Mauerwerk kann Hohlräume enthalten oder geschädigt sein durch Risse und innere Zerstörungen, oder es kann Gefügeveränderungen aufweisen. Insbesondere bei gipshaltigen Materialien muss mit Auflösungs- und Umkristallisationserscheinungen gerechnet werden. Damit kann die statische Tragfähigkeit gegenüber einem Ausgangs- oder Idealzustand verringert werden. Mit Injektionen kann dem entgegengewirkt werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

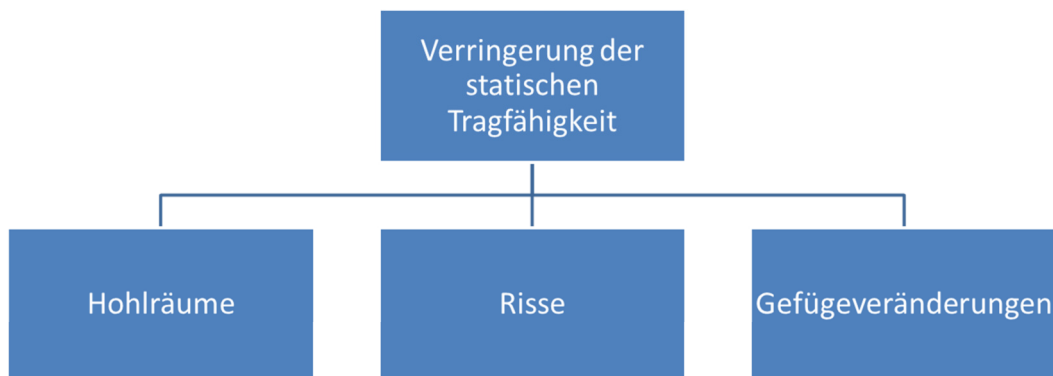


Bild 106 Schäden im historischen Mauerwerk

In Kapitel 2 sind die unterschiedlichen sulfathaltigen Mauerwerkstypen aufgeführt.

In [121] wird für den Sonderfall Instandsetzung gipshaltigen Mauerwerks auf folgendes hingewiesen: „Die Ertüchtigung geschädigter Mauerwerksstrukturen durch Injektions- und Verpressmörtel ist weitestgehend zu vermeiden.“ Weiterhin heißt es: „Im Ankerbereich erforderliche Verpressungen sind zu minimieren.“ Diese Aussagen beziehen sich hauptsächlich auf zwei Probleme:

1. Injektionen mit hydraulischen Materialien führen bei ausreichend Feuchtigkeit zu einer Ettringit- und/ oder Thaumasitbildung. Diese Reaktionen führen zu einer Gefügezerstörung.
2. Injektionen bringen einen erhöhten Wassereintrag in das Gefüge mit sich. Dieses führt zu einer Verringerung der Festigkeit des gipshaltigen Mauermörtels.

Für einige Instandsetzungen sind derartige Eingriffe jedoch unumgänglich. Mit dem unter Kap. 5 vorgestellten Material sollen Injektionen mit einer ausreichenden Festigkeitsentwicklung ohne hydraulische Anteile ermöglicht werden. Entsprechend werden keine Schadminerale gebildet. Eine Verringerung der Festigkeit des Originalmörtels durch wasserhaltige Injektionen mit dem formulierten Material kann nicht ausgeschlossen werden. Das entwickelte Material kann aber auf die Feuchtigkeit im Mauerwerk eingestellt werden,

so dass es in gewissen Grenzen auch im feuchten Mauerwerk tragende Funktion übernehmen kann.

Generell unterscheidet man beim Injizieren zwischen dem reinen Verfüllen und dem Verpressen mit Druck. Welche der Möglichkeiten zur Anwendung kommt, hängt von den vorhandenen Gegebenheiten und Zielstellungen ab.

9.1.1 Verfüllen/ Verpressen von Hohlräumen

Ziel dieser Maßnahmen ist es, eine Verbesserung der statischen Tragfähigkeit im Vergleich zum Istzustand zu erreichen. Beim Verfüllen/ Verpressen von Hohlräumen ist dies nur schwer möglich, da das Injektionsgut den historischen Mörtel nicht verdrängen kann. Ihn zu durchdringen gelingt mit mineralischem Injektionsgut nicht oder nur in geringem Ausmaß, da dieses sich schwer in das Porengefüge des Fugenmörtel einbringen lässt. Überschüssiges Wasser aus den Injektionen kann je nach Zustand von den Originalmörteln aufgenommen werden und zu einer temporären Festigkeitsverringern führen.

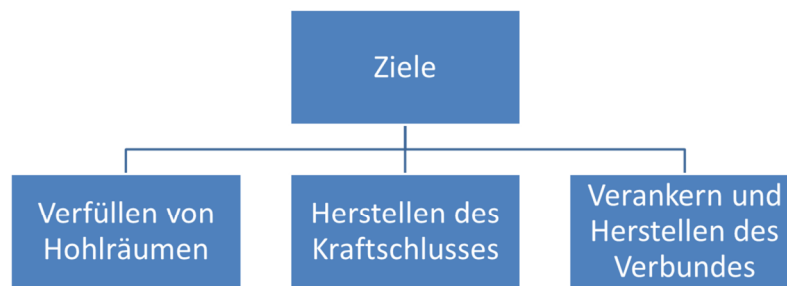


Bild 107 Ziele für die Instandsetzung durch Injektionen

Eine gewisse Erhöhung der berechneten Tragfähigkeit kann durch das Verfüllen der Hohlräume erfolgen, weil sich anhand der Regelungen für Natursteinmauerwerk dabei der Übertragungsfaktor nach DIN 1053-1 [116] (bzw. DIN EN 1996-1-1/NA [117] im Zusammenhang mit DIN EN 1996-1-1 [124]) erhöhen lässt (vgl. dazu auch Rustmeier [125]).

Wenn alle Hohlräume des im Bild 109 dargestellten Querschnitts eines Schichtenmauerwerks verpresst werden, dann sind auch die hohlen Lagerfugen verfüllt (in Bild b punktiert dargestellt) und stehen damit für die Lastübertragung zur Verfügung. Es kann damit ein größerer Übertragungsfaktor η erreicht werden. Bei den im Bild vorliegenden Verhältnissen erhöht er sich auf $\eta=0,70$, wodurch die Einordnung in eine höhere Güteklasse vorgenommen werden kann, sofern die anderen Voraussetzungen dazu erfüllt sind (vgl. Tabelle NA.L.1 in DIN EN 1996-1-1/NA [117]). Bei Zuordnung des Mörtels zur Mörtelgruppe NM II (Altmörtel und Verpressgut), des Steins zu einer Festigkeit $> 50 \text{ N/mm}^2$ ergäbe sich bei

- Güteklasse N1 eine Mauerwerksfestigkeit von $f_k = 1,7 \text{ N/mm}^2$ und bei Zuordnung zur
- Güteklasse N2 eine Mauerwerksfestigkeit von $f_k = 3,0 \text{ N/mm}^2$

Natürlich lässt sich die Festigkeitserhöhung nicht immer rechnerisch nachweisen, jedoch demonstriert das Beispiel den Effekt, den man erreichen kann.

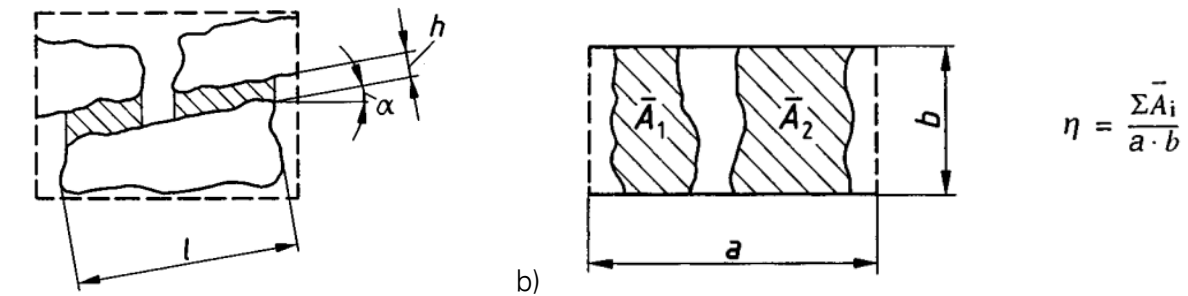
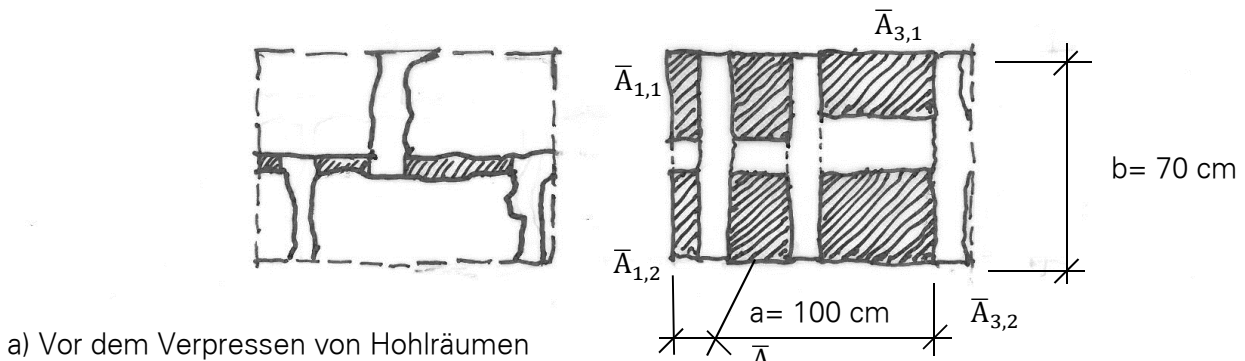
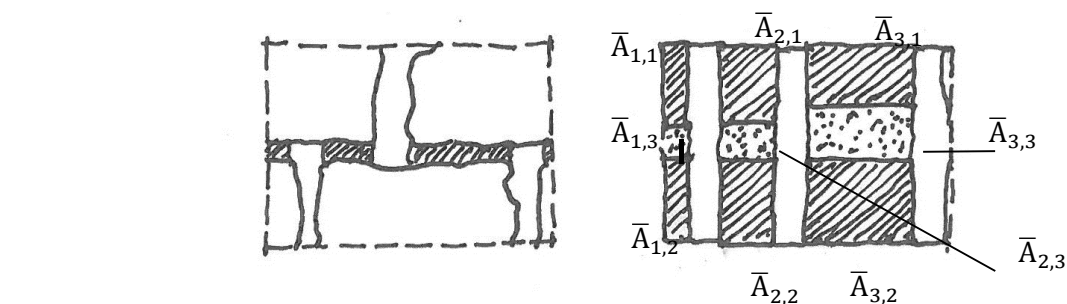


Bild 108 Definition der Übertragungsfläche bei Natursteinmauerwerk; a) Ansicht aus [116]– Zustand vor dem Verpressen, b) Grundriss des Wandquerschnittes mit Definition des Übertragungsfaktors



$$\eta_0 = \frac{\sum_{i=1,j=1}^{i=3,j=2} \bar{A}_{i,j}}{a \cdot b} = \frac{3800}{7000} = 0,54$$



$$\eta_v = \frac{\sum_{i=1,j=1}^{i=3,j=3} \bar{A}_{i,j}}{a \cdot b} = \frac{4900}{7000} = 0,70$$

Bild 109 Schematisches Beispiel für die Erhöhung der Übertragungsfläche bei Natursteinmauerwerk in Anlehnung an [116] bzw. [117]

Das gilt nicht für Mauerwerk aus künstlichen Steinen, da man hier von einer vollfugigen Mauerung – zumindest in der Lagerfuge - ausgehen kann. Sind erhebliche Hohlräume in den Fugen vorhanden, geht es darum, den eigentlich handwerklich sachgerechten Zustand

herzustellen, mit dem man das Mauerwerk dann festigkeitsmäßig z.B. mithilfe der Normtabellen oder Formeln einschätzen kann ([21] oder [23]).

Häufig muss zweischaliges Mauerwerk aus Naturstein, bei dem Innen- und Außenschale gut durchgemauert sind und der Zwischenraum der mit wenig oder ohne Mörtel verfüllt worden ist, ertüchtigt werden.

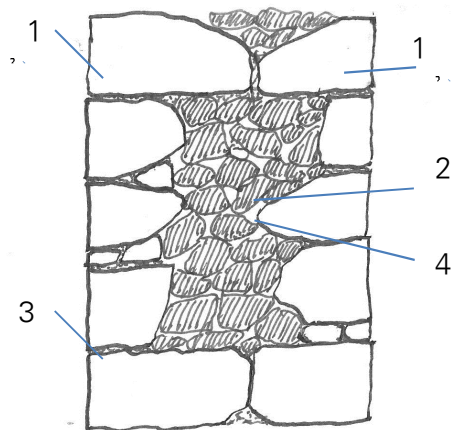


Bild 110 *Schematische Darstellung;
zweischalige Wand mit Füllung
aus kleineren Bruchsteinen*
1 – Bruchstein „Verblendschale“;
2 – Hintermauerungsstein
(kleinere Bruchsteine);
3 – Fugenmörtel;
4 – Hohlraum)

Für derartige Injektionen können die im Projekt formulierte Injektionsmörtel und Injektionsschaummörtel zur Anwendung kommen. Die Anwendung des Mörtels ist mit einem Wassereintrag in das Mauerwerk verbunden. Der **Injektionsschaummörtel** bedingt durch seine geringe Dichte nur eine geringfügige Änderung der Bauwerksmasse und kann über einen angepassten E-Modul verfügen. Das große Porenvolumen bietet Platz für Salzeinlagerungen.

9.1.2 Herstellen des Kraftschlusses

Bei Fugen und Fehlstellen im Mauerwerk, die auf Druck beansprucht werden, ist der Druckkontakt über die verpresste Fläche zu erreichen. Es kann so die Tragfähigkeit in begrenztem Umfang angehoben werden (siehe Kapitel 9.1).

Risse sind Zeichen von Zugbeanspruchung und verlorengegangener Zugfestigkeit. Mit dem Injizieren sollte erreicht werden, dass die Rissflanken sowie der zwischen ihnen bestehende Hohlraum wieder kraftschlüssig verfüllt werden, was jedoch hinsichtlich der Zugkraftschlüssigkeit fraglich ist, da die Rissflanken in der Regel verschmutzt sind und sich nicht so einfach säubern lassen. Ab einer gewissen Größe sollten Risse mit Nadeln verankert oder vernäht werden. Die Risse zu verschließen kann auch Ziel sein um eine Kinematik der gerissenen Bauteile zu verhindern.

9.1.3 Verankern und Herstellen des Verbundes

Für die Übertragung von Zugkräften haben sich Nadeln und Anker etabliert (Bild 111). Die Kräfte vom umgebenden Mauerwerk müssen in den Anker und wieder zurück ins Bauwerk übertragen werden können. Entsprechende Bemessungsmodelle stellen Gigla [109] und Hamdan [110] vor. Im Kapitel 5.2.6 werden Mischungen mit hoher Festigkeit vorgestellt. Diese können als Ankermörtel verwendet werden. Im gipshaltigen Mauerwerk können Edelstahl-, Glasfaser-, Carbon- und Basaltanker zur Anwendung kommen. Für schwarzen Stahl ist der Korrosionsschutz nicht gewährleistet.

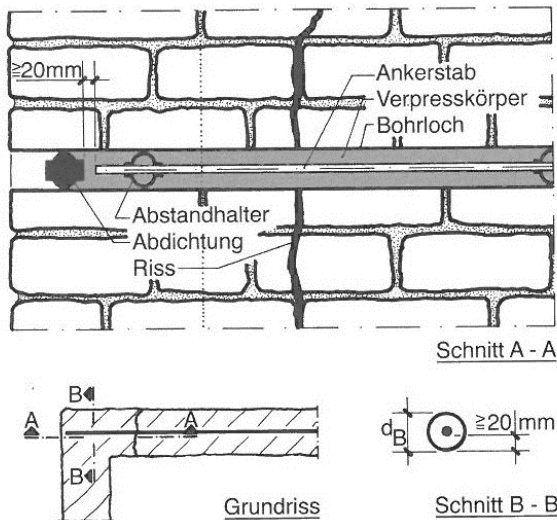


Bild 111 Ankerbohrung mit eingebautem Anker schematisch dargestellt aus [109]

9.2 Vorbereitung, Planung und Vergabe

9.2.1 Bestands- und Schadensaufnahme / Beurteilung des Mauerwerks

Vor jeder Maßnahme an historischem Mauerwerk ist eine Bestandsaufnahme und Schadenskartierung vorzunehmen. Für die Planung müssen maßgerechte Grundrisse und Schnitte erstellt werden. Der Zustand des Mauerwerks ist festzustellen. Dabei sind neben der Erfassung der Schäden (Hohlstellen, Risse, Gefügeschäden) auch eine umfassende Analyse der Baustoffe und deren mögliche Belastung mit Schadstoffen notwendig. Bei historischen Baustoffen müssen meist die relevanten Materialkennwerte ermittelt werden (Dichte, Festigkeiten, E-Modul, Frostbeständigkeit). Ausführliche Angabe dazu sind in [118] und [119] enthalten. „Bei Verdacht auf die Verwendung von gipshaltigen Mörteln, Gipsmörteln oder Gips- bzw. Anhydritsteinen sind detaillierte Analysen am Bestand zwingend erforderlich. Bei Hinweisen auf Standsicherheitsprobleme ist zwingend ein mit historischen Bauwerken erfahrener Tragwerksplaner hinzuzuziehen.“ ...„Der Umfang der Voruntersuchungen richtet sich nach den durchzuführenden Instandsetzungsmaßnahmen. Besonders bei geplanten Eingriffen in das Innere des Mauerwerks (z.B. zur Verbesserung des Tragverhaltens) müssen detaillierte Kenntnisse zu den dort vorhandenen Materialarten und zu ihrer Verteilung sowie zu Belastungssituationen vorliegen“. [121]

Im sulfathaltigen Mauerwerk sind zu untersuchen:

- Anomalien - größere Hohlräume, deren Anordnung und Verteilung in der eigentlichen Mauerwerksstruktur, z. B. Schächte, Kanäle, Schornsteine, Rohrleitungen, Drainagen etc.
- Hohlraumanteil - kompletter Anteil an Hohlstellen, Rissen, ungefüllten Fugen und Klüften; bei einschaligem Mauerwerk aus künstlichen Steinen meist gering; bei mehrschaligem Mauerwerk und einschaligem Mauerwerk aus Naturstein oft wesentlich (5 bis 25 Vol.-%); bestimmbar durch Probebohrungen und/ oder Probeinjektionen

- Sulfatgehalt des Originalmörtels, -steins und von eventuell vorhandenen Füllmaterialien; dabei ist auf eine repräsentative Probenahme zu achten (Recherche unterschiedlicher Bau- und Sanierungsabschnitte, Statistik); ein stufenweiser Masseverlust bei 40°C und 105°C eine erste Orientierung bieten; weitere Untersuchungen müssen in einem Fachlabor vorgenommen werden (Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit, Röntgenbeugungsanalyse, Thermoanalyse, etc.)
- Zustand des Originalmörtels und der Originalsteine
- Feuchtegehalt des umgebenden Mauerwerks - sollte nach [120] bestimmt werden um die Konsistenz und die Zusammensetzung des Injektionsgutes darauf einzustellen; Ermittlung ob es bereichsweise Unterschiede gibt
- Salzgehalt und Gehalt an bauschädlichen Substanzen; bestimmbar nach [118], Art und Konzentration und Herkunft der Salze; das zum Einsatz kommende Injektionsgut muss mit den am Bau existierenden Salzen verträglich sein.
- Wasseraufnahmefähigkeit des Originalmörtels und des Steins zur Einstellung des Wasser-Feststoffgehaltes des Verpressgutes
- **Sind bereits hydraulische Bestandteile im Mauerwerk vorhanden (eventuell aus bereits erfolgten Fehlsanierungen)?**
- Gips- und Anhydritgehalte im Baugrund

Wichtig ist die Untersuchung aller Mauerwerksschalen; gips- und anhydritfreien Außenschalen können im mehrschaligen Mauerwerk gipshaltige Innenfüllungen enthalten!

Bohrungen für die Bauwerksuntersuchungen sind im Trockenbohrverfahren vorzunehmen.

9.2.2 Planung

Wie jede andere Maßnahme ist auch das Injizieren/ Verpressen von gipshaltigem Mauerwerk genau, zutreffend und unabhängig von ausführenden Firmen zu planen. Nur so wird gewährleistet, dass

- die Ursachen der Schäden beseitigt werden,
- die am besten geeignete Technologie eingesetzt wird und
- das zutreffende Material zur Anwendung kommt.

Im Zuge der Planung ist dann auch eine Nachweisführung für den sanierten Zustand beizubringen.

Bei Sulfatgehalten von > 3 M.-% ist ein erfahrener Fachplaner hinzuzuziehen!

Bei der Planung des Tragverhaltens des Mauerwerks ist das feuchteabhängige Kriechverhalten von Gips zu beachten. Durch mineralische Injektionen wird Feuchtigkeit in das Mauerwerk eingebracht. Diese kann an das umgebende Mauerwerk abgegeben werden und so zu Kriechverformungen führen.

Für alle Objekte mit sulfathaltigem Mauerwerk ist zwingend notwendig zu planen:

- „Überprüfung, Reparatur und Ergänzung aller wasserableitenden Systeme und Abdichtungen (Dachentwässerung, Drainagen/ Vertikalabdichtungen, Grundleitungen, Gesimse, Verdachungen usw.),
- Verhinderung von Wassereintrag während der Bauphase z.B. durch Abplanen, ggf. Überdachung der Arbeitsgerüste und durch Einsatz von Trockenreinigungsverfahren“ [121]

Die Sanierungsmöglichkeiten für gipshaltiges Mauerwerk sind entscheidend davon abhängig, ob hydraulische Komponenten im Mauerwerk vorhanden sind.

Bei **rein sulfatischem Mauerwerk** dürfen nur rein sulfatische (wie unter Kap. 5 beschrieben) oder extra für diesen Zweck optimierte Materialien zur Anwendung kommen (Patent-Nr. 3437680, Patent-Nr. 10 2017 222 491).

Alternativ können bestimmte organische Materialien verwendet werden. Diese waren nicht Bestandteil des hier beschriebenen Projektes.

Bei **bereits mit hydraulischen Materialien saniertem sulfatischem Mauerwerk** ist in vielen Fällen eine Treibmineralbildung im Gange. Dann muss entschieden werden, ob ein Neuaufbau notwendig ist, ob eine Sanierung mit Material entsprechend Patent-Nr. 10 2017 222 491 möglich ist oder ob es alternative konstruktive Lösungen gibt (zum Beispiel Verwendung von Carbonbändern).

In diesem Bericht wird sich entsprechend des Projektzieles ausschließlich auf die Sanierung von rein sulfatischem Mauerwerk bezogen.

Die Ausführungsplanung umfasst neben der konkreten Materialauswahl für das Verpressgut vor allem die Vorgaben zur Verpresstechnologie und die Lage und Anordnung der Packer, das heißt der Stellen, von denen aus das Mauerwerk verpresst werden soll. Zugleich sind Vorgaben für das vorherige Füllen von offenen Fugen und von Rissen zu machen. Bei besonders starken Rissen empfiehlt es sich, dort den Rissen Positionsnummern zu vergeben und konkrete Vorgaben in einer Zeichnung oder Skizze zu machen (Bild 112). Sinnvoll ist es, die Unterlagen der Bestandsaufnahme (Risskartierung) zu verwenden.

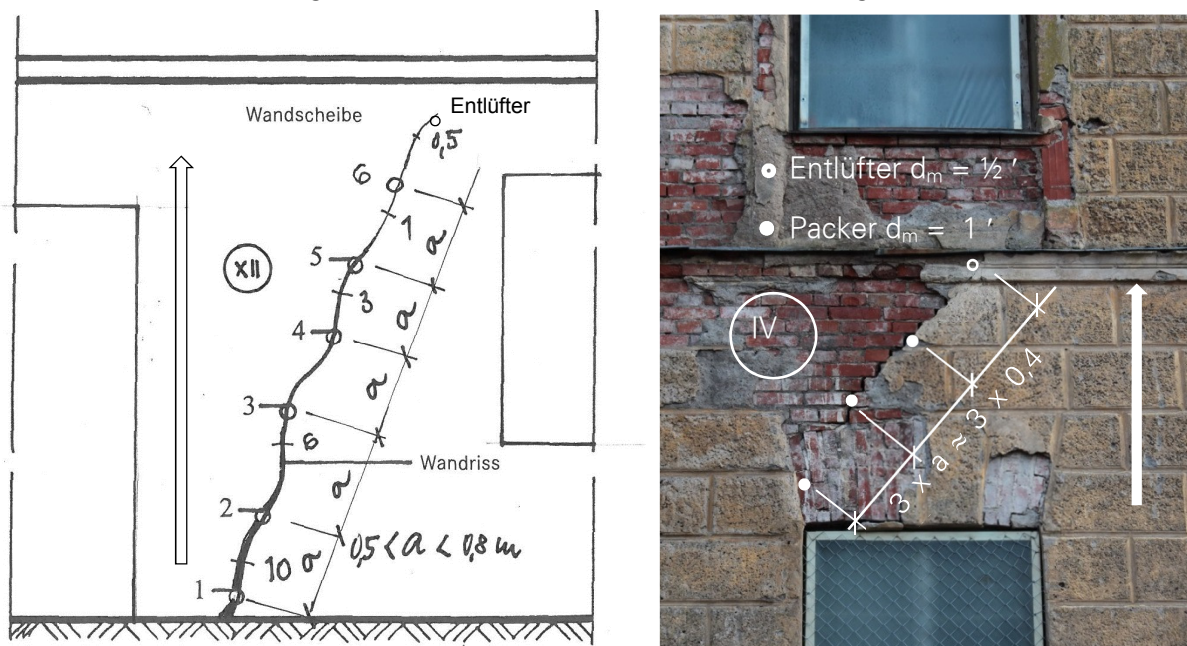
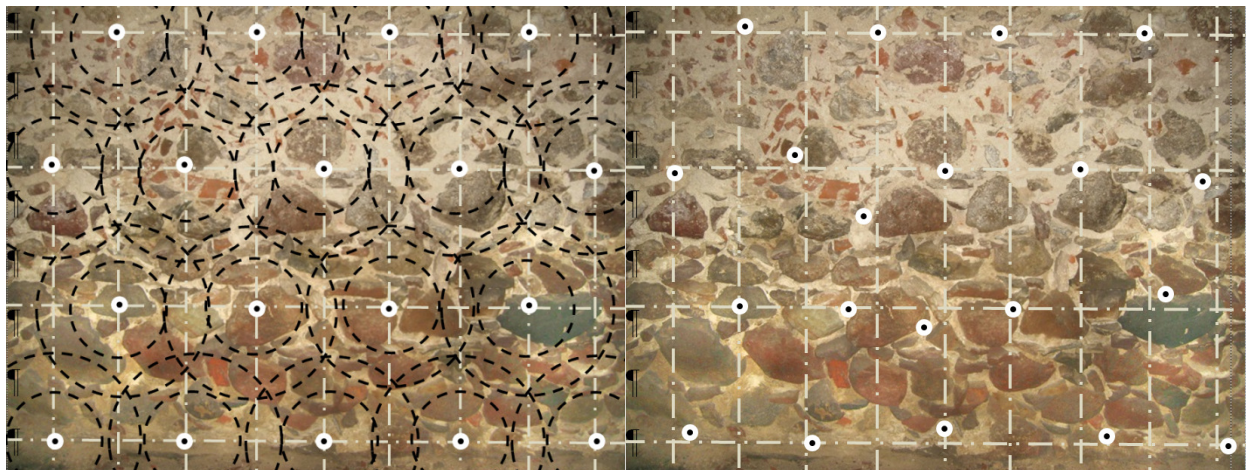


Bild 112 Beispiel einer zeichnerische Vorgabe für das Setzen von Packern; links auf der Grundlage einer Wandansichtszeichnung, Verpressreihenfolge von unten nach oben 1...6, rechts auf der Grundlage einer entzerrten Fotoaufnahme, die maßstäblich als Grundlage dient (Schloss Steinort, Nord-West-Turm 2014)

Ein, für eine flächige Verpressung einer Bruchsteinwand vorgegebenes Raster, ist an der Wand selbst leicht anzupassen. In das Steinmaterial zu bohren und Packer zu setzen ist obsolet. Die Packer sind sinnvollerweise in die Fugen zu setzen. Der Abstand der Packer beträgt je nach Anforderung zwischen 30 und 80 cm.

Die Rasterpunkte müssen deshalb nach eigenem Ermessen dann an der Wand leicht versetzt werden, um tatsächlich in die Fugen zu bohren. Gegebenenfalls macht sich eine gewisse Verdichtung der Bohrungen erforderlich (Bild 113).



a = 80 cm Anordnung ideal

leicht versetzte (und ggf. verdichtete) Anordnung

Bild 113 *links Idealverteilung der Bohrungen nach [122], rechts angepasste Aufteilung der Bohrungen, eingetragen in ein entzerrtes Foto einer Wandansicht*

Beim Setzen von Nadeln werden die Nadelbohrungen zum Verpressen verwendet.

Bild 114 zeigt eine Planung für das Verpressen, Vernadeln und Verankern eines gefährdeten Mauerwerksbaus aus dem 19. Jahrhundert (Schloss Steinort, Nord-West-Turm). Grundlage bildete das Rissaufmaß, das in Ansichten der Fassaden eingezeichnet worden ist.

Bei Ankern mit Endplatte werden Bohrungen zum Verpressen neben die Endplatte gesetzt. Bei Verankerung auf Verbund wird das Ende der Ankerbohrung zum Verpressen genutzt. Sollte das Mauerwerk erhebliche Risse und Hohlräume um die Verbundstrecke herum enthalten, empfiehlt es sich, einen Netzschlauch über den Anker zu ziehen, den Verpressschlauch in diesen einzulegen und so zu garantieren, dass die Verpressstrecke tatsächlich voll verpresst ist. Über weitere Bohrungen senkrecht zur Ankerachse kann der Verpressfortschritt verfolgt werden.

Beim Verpressvorgang entweicht Luft aus dem Mauerwerk, die frei abfließen können muss, um den Verpressvorgang nicht zu behindern. Entlüftungsöffnungen beziehungsweise -bohrungen sind planmäßig vorzusehen oder undichte Stellen zu nutzen, die dann mit Werg verstopft werden. Durch dieses kann die Luft entweichen, jedoch nicht das Verpressgut. Es ist durchaus auch üblich, Entlüftungsröhrchen zu setzen, die nach dem Verpressvorgang abgeschnitten werden.

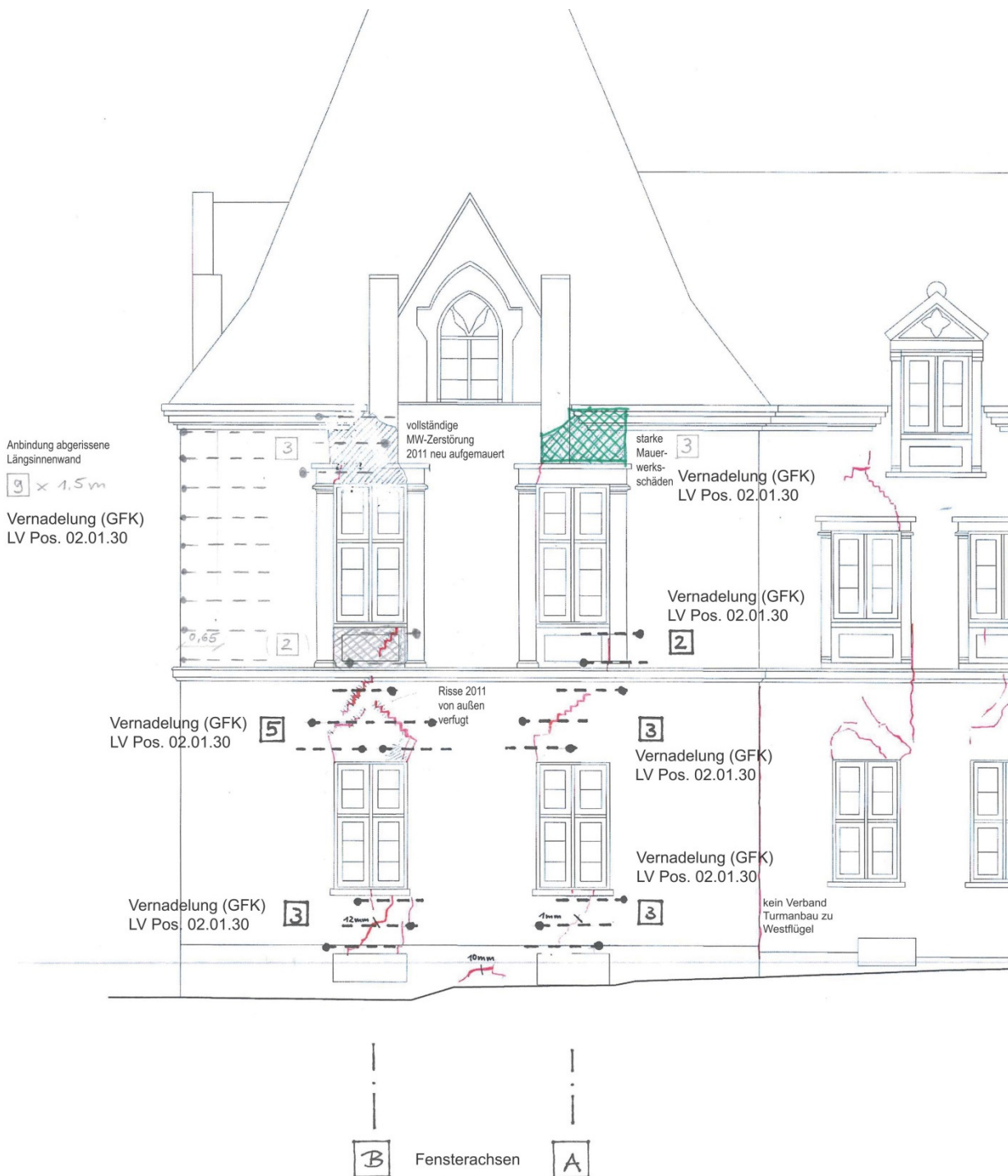


Bild 114 Beispiel für die Planung der Anker und Nadeln – eingetragen in das Rissaufmaß (Schloss Steinort, Nord-West-Turm 2014); die Abstände der Packer im Verlauf der Risse waren pauschal vorgegeben mit $0,6 \text{ m} \leq a \leq 0,8 \text{ m}$

Günstig ist es bereits bei der Planung Kosten für eine Langzeitkontrolle in das Konzept mit einzubeziehen.

9.2.3 Vorbereitung der Vergabe und Vergabe

Bei der Durchführung einer Injektion sind die Erfahrungen der ausführenden Firma mit Injektionen in gipshaltigem Mauerwerk essenziell. Diese sollten mit Referenzen nachgewiesen und vom Planer akribisch geprüft werden (Beziehen sich die Referenzen wirklich auf die Sanierung von sulfathaltigem Mauerwerk? Besitzt die Firma die notwendige Technik? Ist das Angebot bezüglich Arbeitsaufwand und Technik reell? Waren die angegebenen Sanierungen erfolgreich?).

Anker- und Nadelbohrungen sind im Trockenverfahren erschütterungsfrei durchzuführen. Der entsprechende Mehraufwand ist in der Planung zu berücksichtigen.

Weitere kritische Punkte sind die Mengen und die Abgrenzung der Leistungen. Während die Risslängen und Rissweiten noch relativ genau vorherbestimmt werden können, sind die tatsächlichen Hohlraumanteile schwer einzuschätzen. Deshalb ist es sinnvoll, vorher im Zuge der Planung und Ausschreibung Probebohrungen an unterschiedlichen Stellen und in ausreichender Anzahl durchzuführen. Anschließend Probeverpressungen geben Aufschluss über den Verpresserfolg und damit die aufnehmbaren Mengen an Verpressgut (nass), sodass dann über den Ausbeutefaktor auf die erforderliche Menge trockenes Verpressgut zurückgerechnet werden kann. Dabei sind die etwas anderen Werte für die Mörtelausbeute gegenüber den bekannten zu beachten ([123], S. 111 ff.).

Bei Ausschreibungen sind immer wieder die Allgemeinen Vertragsbedingungen und die Vorbemerkungen wichtig. Hier wird festgelegt, was an Leistungen in den Leistungspositionen von Haus aus enthalten ist und was gesondert auszuweisen und zu kalkulieren ist.

Die Leistungstexte müssen umfassend die zu erbringende Leistung beschreiben. Wichtig dabei ist die Abgrenzung zu den Allgemeinen Vertragsbedingungen und was in der konkreten Leistung alles einzukalkulieren ist. Das heißt, dass bindend immer nur Langtexte sein können, wenngleich im Zuge der Umsetzung sich dann Kurztexte für die tägliche Arbeit als vorteilhaft erweisen. Das gilt vor allem auch für die Herstellung des Bezugs zu Zeichnungen, technologischen Vorgaben und Übersichten.

Es ist darauf zu achten, dass man bei der Ausschreibung auch tatsächlich vergleichbare Angebote erhält. Das ist nur durch eine umfassende, nicht auf Annahmen beruhende Beschreibung der Leistungen möglich. Es ist zu entscheiden, ob Alternativen zugelassen werden und wenn, welche Nachweise der Bieter für die Eignung der Alternative zu erbringen hat.

Eventualpositionen werden fast immer anfallen und sollten ebenfalls mit ausgeschrieben werden. Bei der Auswertung ist zu beachten, dass diese unter vergleichbaren Mengenansätzen hochzurechnen sind.

Eine wichtige Aussage der Ausschreibung ist im Hinblick auf Mehr- und Mindermengen zu tätigen. Stichprobenartig durchgeführte Probebohrungen und Probeverpressungen können mehr oder weniger repräsentativ sein, d.h. die angenommenen Mengen können erheblich unter- oder überschritten werden. Insofern ist darauf in der Ausschreibung Bezug zu nehmen.

Zeichnungen und Skizzen schaffen Klarheit für den Bieter und den Bauüberwacher. Die Zuordnung zu Zeichnungen sollte über Kurztexte und Positionsnummern erfolgen.

9.3 Vorbereiten, Verfugen und Setzen von Packern

Lose Putzteile und Schmutz an den Oberflächen des Mauerwerks sind zu beseitigen. Loses Steinmaterial ist zu entfernen und zum Wiedereinsetzen bereitzulegen. Das Mauerwerk muss mit einer groben, steifen Bürste oder einem Stahlbesen abgekehrt oder mit Druckluft gereinigt werden.

Bohrlöcher sollten ebenfalls mit Druckluft ausgeblasen werden, damit kein loses Bohrmehl die Verbundfestigkeit des Injektionskörpers negativ beeinflusst, was besonders bei Nadeln und einer Verankerung auf Verbund wichtig ist.

Mauerwerksausbrüche müssen vor dem Verpressen wieder geschlossen werden. Dafür ist möglichst Originalmaterial zu verwenden.

Fugen sind auszukratzen und neu mit sulfathaltigem Mörtel zu Verfugen, damit kein Verpressgut unkontrolliert austritt.

Größere Fugen sind mit sulfathaltigem Mörtel auszuwerfen.

Entlüftungsmöglichkeiten sind zu gewährleisten, entweder durch Entlüftungspacker oder durch Ausstopfen mit Werg, welches Luft hindurchlässt, jedoch austretendes Injektionsgut stoppt.

Starke Risse deuten darauf hin, dass sich im Bereich des Risses Teile voneinander weg bewegt haben. Allein mit Verpressen ist hier schwer eine Wiederherstellung des Verbundes zu erreichen. In diesem Falle empfiehlt es sich, das Verpressen mit dem Vernadeln der Risse zu kombinieren. Sofern sich lose Teile im Riss befinden, sind diese herauszunehmen. Zum Reinigen empfiehlt sich das Ausblasen mit Druckluft. Vor dem Vermörteln sollte mäßig vorgenasst werden. Das Verfugen erfolgt bis zur Oberfläche Rohkonstruktion.

Beim Verfugen **feiner Risse** im Bereich von 1/10 mm bis zu 5 mm ist darauf zu achten, dass das sulfathaltige Verfugmaterial auch wirklich eine innige Verbindung mit den Rissflanken eingeht.

Packer sind beim Schließen von ausgebrochenem Mauerwerk, dem Verfugen von Rissen oder offener Fugen im Mauerwerk gleichlaufend mit zu setzen. Wenn ein flächiges Verpressen vorgenommen wird, sind extra Bohrungen einzubringen, die in Fugen gesetzt werden und im Hohlraum enden. Verwendet werden können zum Beispiel Schlauch-, Rohr- und Schraubpacker.

9.4 Bohren

Für das Einsetzen von Nadeln und Ankern bzw. zum Injizieren des Verpressmörtels müssen Bohrungen in das Mauerwerk eingebracht werden. Bei sulfathaltigem Mauerwerk muss dies generell trocken und erschütterungsfrei erfolgen [121]. Wenn es um größere Bohrdurchmesser für Anker oder Nadeln geht, wird heute das erschütterungsfreie Drehbohren angewendet.

9.5 Technik zum Verpressen

Geringe Injektionsmörtelmengen können mit einem **Mörtelrührer** gemischt werden.

Soll ein Injektionsschaummörtel hergestellt werden, ist für die Schaumherstellung ein schnell drehendes Rührwerk (Handbohrmaschine) mit dem Rührer, der einen hohen Lufteintrag gewährleistet (zum Beispiel Collomix DLX 152) notwendig. Analog ist die Verwendung von geeigneten Schaumgeneratoren möglich.

Das Injektionsgut muss vom Vorratsbehälter über die **Pumpe** und den Injektionsschlauch in das Mauerwerk transportiert werden. Die gebräuchlichsten Pumpen sind Kolben-, Schnecken- und Membranpumpen.

Über einen Druckschlauch gelangt das Verpressgut von der Pumpe zum Packer in der Wand. Um den Druck zu kontrollieren und nicht über ein festgelegtes Grenzmaß hinaus zu steigern, muss ein **Druckmanometer** vorhanden sein, das sich am besten an der Kupplungsstelle zum Packer befindet. Es muss auf jeden Fall für den Maschinenführer einsehbar sein, um bei einem plötzlichen Ansteigen des Druckes sofort reagieren zu können.

Injektionspacker (Einfüllstutzen) sind Hilfsmittel für die Injektionsabdichtung zwischen Schlauch und Bauwerk. Sie müssen sichern, dass beim Einbringen des Injektionsmaterials dieses nicht zwischen Mundstück am Schlauch und dem Bauwerk austritt und sich der gewünschte Druck aufbauen kann. Die Art der Packer, die zum Einsatz kommen, bzw. die dabei verwendete handwerkliche Technik hängt stark vom Zustand des Mauerwerks und seiner Oberfläche sowie seiner inneren Struktur ab. Heute üblich sind Einschlag-, Schlauch-, Rohr- und Schraubpacker.

9.6 Injektionsgut

Die chemischen und mechanischen Eigenschaften des erhärteten Verpressgutes sind auf das vorgefundene Mauerwerk abzustimmen, damit ein möglichst homogenes Gefüge erreicht wird. Das Mauerwerk muss danach in der Lage sein, die anfallenden Beanspruchungen auch aufzunehmen und weiterleiten zu können. Das heißt, dass die Druckfestigkeit als wesentlicher Parameter etwa der des vorhandenen Mörtels entsprechen oder geringfügig darüber liegen sollte, um einerseits Spannungsspitzen als auch ein Nachgeben zu vermeiden, da der umgebende Mörtel bereits vorgestaucht ist. Im gipshaltigen Mauerwerk ist dies nicht mit einem normalen Stuckgips realisierbar. Der Einsatz von Materialien auf der Basis hydraulischer Bindemittel führt zur Bildung von Treibmineralien und/ oder zersetzt das Mörtelgefüge (Ettringit- und/ oder Thaumasitbildung).

Auch die vorliegenden Projektergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Mörteln auf der Basis von hydraulischen Bindemitteln und Luftkalk in der Regel nicht für den Einsatz im gipshaltigen Mauerwerk geeignet ist (s. Kap. 4.4). Insbesondere Romanzemente, aber auch einige Fertigprodukte, die vom Hersteller als geeignet für gipshaltiges Mauerwerk ausgewiesen wurden, sind als nicht geeignet einzustufen. Zwei Fertigmörtel mit sehr hohem Hüttensandanteil wiesen in der Prüfung nur geringe Längenänderungen auf. Das entsprechende Langzeitverhalten unter den jeweiligen Objektbedingungen wäre vor einer Anwendung zu prüfen.

„Für die Ermittlung der Eignung von Mörteln oder Bindemitteln zur Instandsetzung von gipshaltigem Mauerwerk existieren keine genormten Prüfverfahren.“[121] Infolgedessen ist die Auswahl eines dauerhaften Materials für derartige Injektionen problematisch.

Im Kapitel 5.2 wurde ein für sulfathaltiges Mauerwerk geeignetes Material vorgestellt. Es basiert auf einer Mischung aus Alpha- und Beta-Calciumsulfathalhydrat (Mischung aus Form- und Stuckgips). Für den jeweiligen Anwendungsfall muss das Material, entsprechend der Eigenschaften des umgebenden Mauerwerks und der Zielsetzung der Sanierungsmaßnahme, angepasst werden (Festigkeit, E-Modul, Dichte). Dies kann durch die Zugabe von Calciumhydroxid (Tradical) erfolgen.

Für das ausschließliche Füllen von großen Porenräumen ist ein Schaummörtel geeignet. Angaben dazu befinden sich in Kap. 5.3.

Das Verpressmaterial muss dauerhaft die von ihm erwarteten Eigenschaften garantieren können und darf keinen zeitabhängigen Veränderungen unterliegen. Es darf das Mauerwerk nicht so verändern, dass seine Dauerhaftigkeit beeinträchtigt wird. Bei sulfatischem Material muss insbesondere der Festigkeitsabfall und das Kriechverhalten dieses Materials bei Durchfeuchtung beachtet werden (Kap. 2).

Im sulfatischen Milieu ist der Korrosionsschutz von Nadeln und Ankern aus schwarzen Stahl nicht gewährleistet (pH-Wert < 12). Deshalb müssen hier Anker und/ oder Nadeln aus Glas, Basalt, Edelstahl oder Carbonfasern zum Einsatz kommen.

Es muss gewährleistet sein, dass das Verpressgut ausreichend fließfähig ist, die Hohlräume und Risse ausfüllen kann und nicht schwindet. Die Riss- und Hohlraumgrößen haben Einfluss auf die erforderliche Fließfähigkeit. Es darf während des Verpressens nicht zu Sedimentationserscheinung, d.h. zum Absetzen von größeren Bestandteilen kommen. Das Verpressgut muss gut an den Rissufern und den Hohlraumwandungen anliegen. Werden die unter 5.2 und 5.3 beschriebenen Materialien modifiziert, müssen die vorgenannten Bedingungen Beachtung finden. Die Zeitspanne vom Mischbeginn bis zum Erstarrungsbeginn muss für das Vorhalten, Transportieren und Verpressen ausreichend eingestellt sein. Das im Projekt bearbeitet Mörtelsystem wurde mit Seignettesalz verzögert.

Das im Projekt entwickelte Injektionsgut muss trocken zu einer homogenen Mischung verarbeitet und trocken gelagert werden. Da die Eigenschaften des Nassgutes und auch die des Festmörtels stark vom Wasser-Feststoff-Gehalt abhängen, müssen bei einer Modifizierung des beschriebenen Mörtels die Frisch- und Festmörteleigenschaften in einem Vorversuch ermittelt werden.

9.7 Durchführung

Auf der Baustelle wird die Fertigmischung dem Wasser zugefügt.

Diese Frischmörtelmischung wird mit einem Zwangsmischer oder einem Rührwerk ca. 2 Minuten aufbereitet. Bis dahin sollte die zur Verarbeitung notwendige Konsistenz erreicht sein.

Soll ein Injektionsschaummörtel injiziert werden, dann muss parallel zur Mörtelmischung ein stabiler Schaum hergestellt werden. Entsprechend der angestrebten Festmörtelrohichte werden Schaum und Mörtel in einem bestimmten Verhältnis volumetrisch gemischt. Dies erfolgt in der Regel mit einem Mörtelquirl. Größere Mengen können auch mit geeigneten Anlagen hergestellt werden (zum Beispiel in einem Schaumgenerator). Der so erhaltene Frischschaummörtel muss stabil und pumpfähig sein. Das angemischte Injektionsgut wird dann in den Vorratsbehälter der Pumpe gegeben. Größere Vorratsbehälter sollten ein Rührwerk haben, das das Injektionsgut kontinuierlich durcharbeitet, damit es nicht entmischt. Bei einem Frischschaummörtel muss in diesem Fall sichergestellt sein, dass der Mörtel hierbei keinen Dichtezuwachs erfährt (Zerstörung der Luftblasen). Über die Pumpe wird es dann im Schlauch an die Verpressstelle transportiert, über Packer beziehungsweise die Bohrlöcher gelangt es dann in das Mauerwerk. Innerhalb des Projektes wurde mit einem Verpressdruck von ca. 1 bar gearbeitet. Im historischen Mauerwerk sollte generell nicht mit Drücken über 1,5 bar gearbeitet werden. Das Verpressen des Mauerwerks wird von unten nach oben ausgeführt. Solange das Injektionsgut fließt, baut sich der hydrostatische Druck in Abhängigkeit von der Steighöhe auf (Bild 115). Die Gefahr, dass man mit hohen Drücken das Mauerwerkgefüge zerstört, ist groß. Unter ungünstigen Bedingungen können sich Schalen lösen und das Injektionsgut dann offen austreten. Erfahrung und konzentrierte Beobachtung

des Verpressvorganges sind die Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung einer Verpressung.

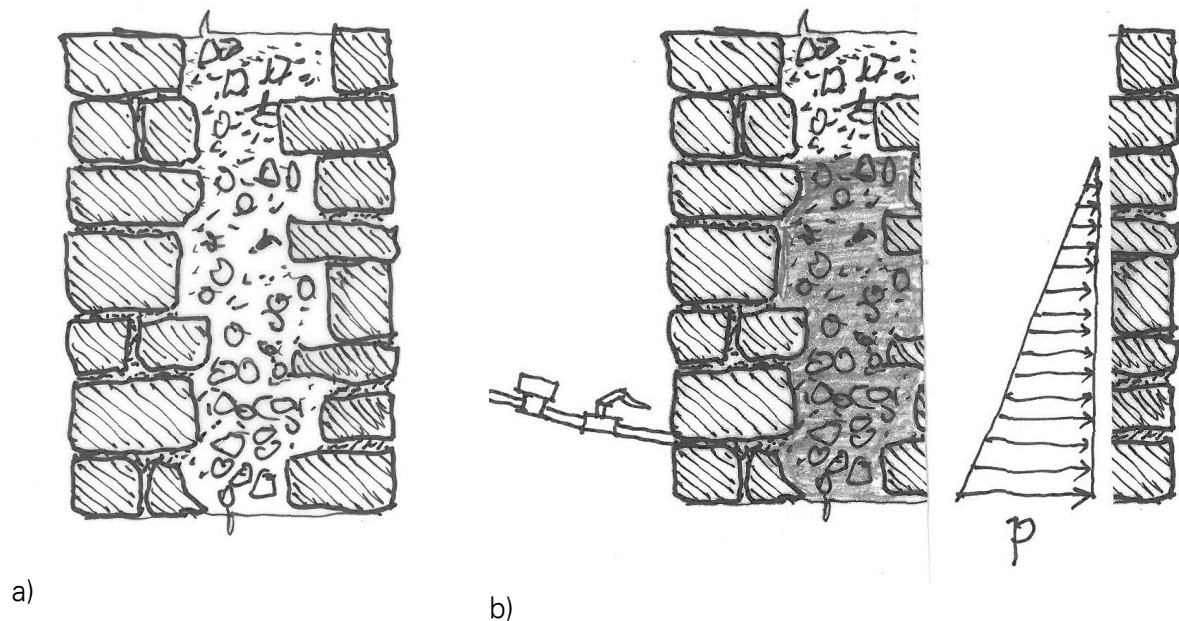


Bild 115 Aufbau eines hydrostatischen Drucks („Schalungsdruck“) des frischen Injektionsgutes (b) bei zweischaligem Mauerwerk mit loser Füllung im Schalenzwischenraum (a)

Während des Verpressvorganges muss sichergestellt sein, dass die verdrängte Luft entweichen kann.

Ankerbohrungen werden von innen heraus verpresst. Dazu wird der Verpressschlauch mit etwas Abstand am Anker angeheftet und mit ihm eingesetzt (Bild 116).

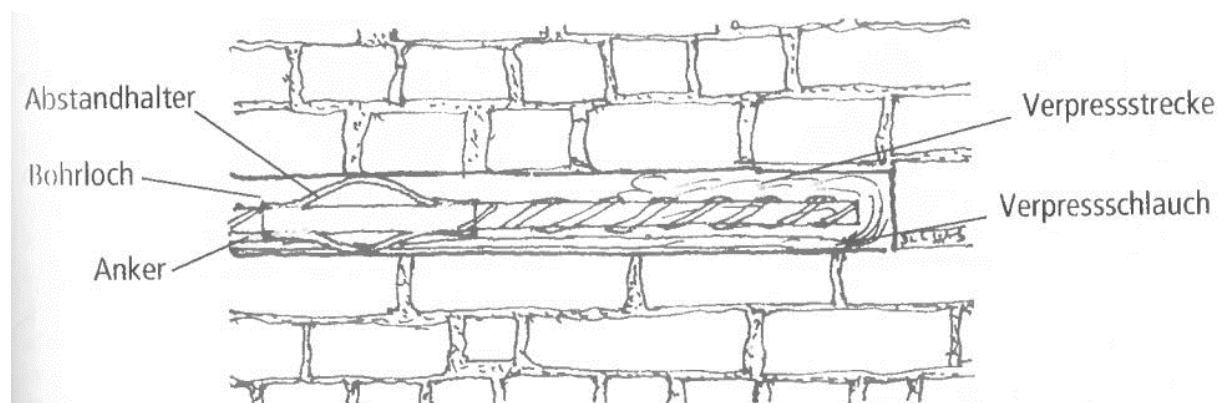


Bild 116 Lage eines noch unverpressten Ankers im Bohrloch, aus [93]

Mit dem entwickelten Injektionsgut sind Ankerverpressungen aufgrund der ermittelten Werte generell möglich. Ein praktischer Nachweis ist bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erfolgt.

Ein Verpressen gegen das Erdreich ist für alle sulfathaltige Materialien nicht zu empfehlen. Erfahrungen zeigen, dass die Anwendung von Gips über Jahrhunderte meist oberhalb der Geländeoberkannte oft sogar oberhalb der Spritzwasserzone erfolgte.

Für alle mit sulfatischen Materialien durchgeführten Arbeiten gilt: Gipsrückstände am Arbeitsmaterial wirken beschleunigend auf die Hydratation. Infolgedessen ist insbesondere bei Injektionsarbeiten (relativ dünne, lange Schläuche, Kupplungen) mit sulfatischen Material auf eine gute Sauberkeit der Arbeitsmittel zu achten!

9.8 Qualitätskontrolle und Injektionserfolg

Das Material für eine Qualitätskontrolle sollte immer nach der Mörtelpumpe entnommen werden.

Relevante Eigenschaften sind die Frisch- und Festmörtelrohddichte, die Erstarrungszeit, die Druck- und Biegezugfestigkeit und das Schwindmaß. Die Proben sind während des Arbeitsvorganges zu entnehmen, um eine Überprüfung der eigentlichen Ausführung zu gewährleisten. Sie sind normengerecht oder unter den entsprechenden Bedingungen am Objekt bis zur Prüfung zu lagern (feuchteabhängige Festigkeit). Über die Prüfungen sind Protokolle anzufertigen.

Prüfungen am Bauwerk sind durch endoskopische Untersuchungen möglich. Das Überbohren von Verpressbereichen, Nadeln oder Ankern ist mit unterschiedlichen Bohrdurchmessern möglich. Mit Spiralbohrern lassen sich Bohrungen mit einem geringeren Durchmesser in das injizierte Mauerwerk einbringen. Mit einer endoskopischen Befahrung des Bohrloches kann man sich dann Gewissheit über den Verpresserfolg verschaffen.

9.9 Überwachung und Abrechnung

Grundlage für die Überwachung und Abrechnung sind die Planungsunterlagen einschließlich der Leistungsbeschreibung. Da es bei historischen Bauten immer wieder zu gewissen Abweichungen kommt, ist ein ***kontinuierliches Fortschreiben der Planungsunterlagen als Leistungsbeleg*** zwingend notwendig.

Seitens der ausführenden Firma sind Bohrprotokolle, Protokolle über die Materialzusammensetzungen, Verpressprotokolle und Bautagesberichte zu führen. Bohrkerne sollten, sofern sie anfallen, bis zur Beendigung der Baumaßnahme vorgehalten werden, bevor man sie nach entsprechender Dokumentation entsorgt.

In die Ausführungszeichnungen sind die tatsächlich ausgeführten Arbeiten einzutragen (Bild 117).

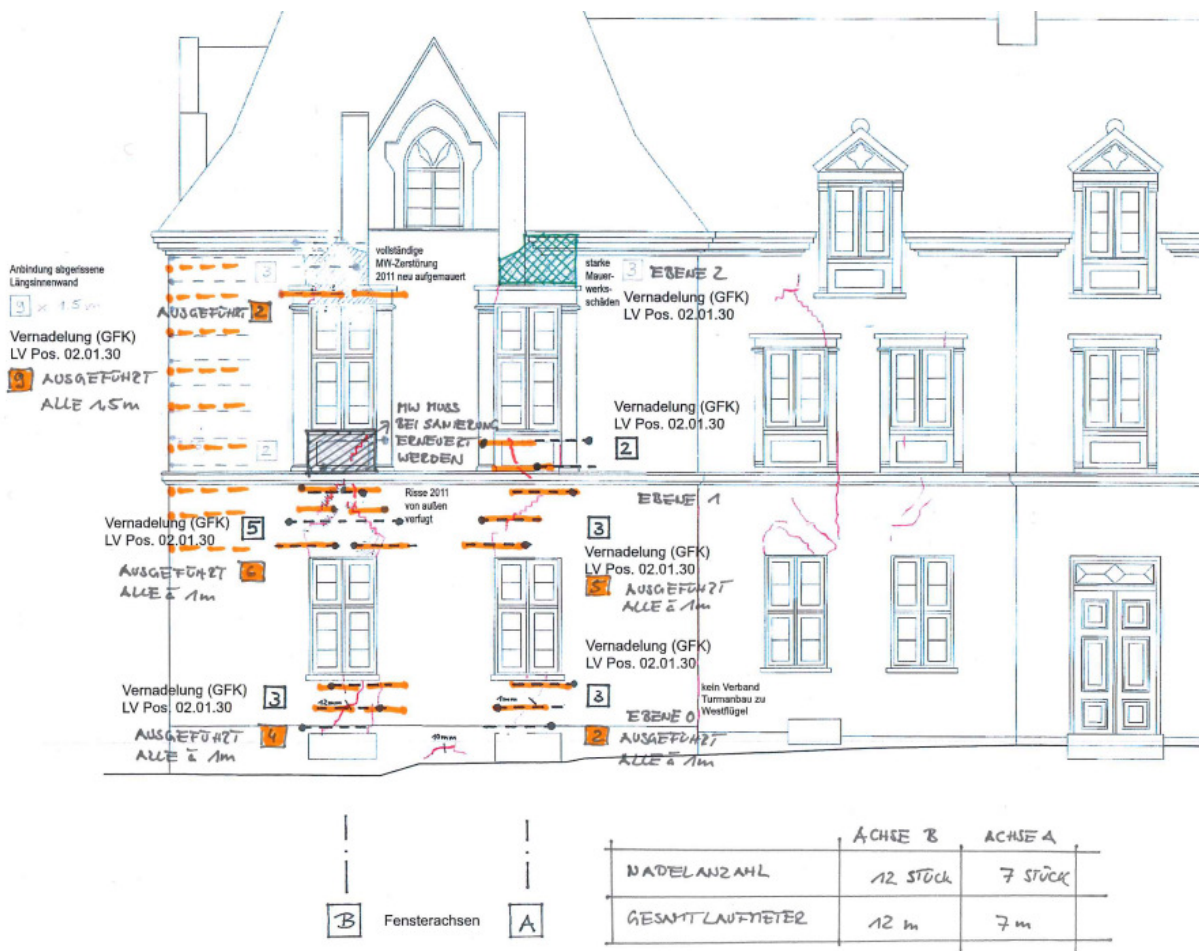


Bild 117 *Aufmaß der ausgeführten Arbeiten, eingetragen in die Ausführungszeichnung gem. Bild 114 (Schloss Steinort, Nord-West-Turm 2014)*

Das verbrauchte Material ist fortlaufend zu erfassen. Die laufenden Kosten sind fortzuschreiben und mit dem Kostenanschlag zu vergleichen. Dabei sind Eventual- oder Alternativpositionen mit zu verfolgen und hochzurechnen. Kommt es zu Mehr- oder Mindermengen, sind rechtzeitig geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die Folgen zu minimieren und daraus erwachsende Kosten zu begrenzen.

9.10 Dokumentation und Langzeitkontrolle von gipshaltigen Mauerwerksbauten

Am Ende einer solchen speziellen Baumaßnahme sollte dem Eigentümer/ zuständigen Behörden eine Dokumentation zur Verfügung gestellt werden, die vollständige Aussagen zu den durchgeführten Maßnahmen und den eingesetzten Materialien (Art und Menge), zum Durchführungszeitraum und den beteiligten Fachleuten enthält. Die Ergebnisse von vorgenommenen Qualitätsprüfungen sind beizufügen. Es soll damit sichergestellt werden, dass diese Informationen bei zukünftigen Baumaßnahmen verfügbar sind. Dabei sind die tatsächlich durchgeführten Arbeiten und die Einbaustellen von Nadeln und Ankern festzuhalten. Eine Fotodokumentation erhöht den Aussagewert.

Nach dem Abschluss der derartiger Sanierungsarbeiten im sulfathaltigen Mauerwerk sollte unbedingt an eine geplante Langzeitkontrolle erfolgen. Zurückhaltung bei historischen Bauwerken ist stets oberstes Gebot. Das kann aber auch dazu führen, dass später gegebenenfalls noch einmal mit ergänzenden Maßnahmen nachgesetzt werden muss. So sind Verformungsmessungen sinnvoll, die in gewissen Zeitabständen wiederholt werden können.

Eine einfachere Erfolgskontrolle stellt das Anbringen von Rissmonitoren oder Gipsmarken dar. Es ist darauf zu achten, dass sie auf dem Mauergrund aufgebracht werden und sich dort nicht ablösen können. Die Gipsmarken werden mit dem Datum des Tages, an dem sie gesetzt worden sind, versehen. Über eine regelmäßige Ablesung und Protokollierung des Ergebnisses kann man dann feststellen, ob noch Bewegung im Bauwerk vorhanden ist oder nicht.

Besonders gefährdete oder im Fokus der Öffentlichkeit stehende Gebäude sollten mit einem Monitoringsystem ausgestattet werden, welches kontinuierlich Verformungsdaten erfasst, speichert und eine externe Überwachung ermöglicht.

Insbesondere bei gipshaltigem Mauerwerk ist eine gute Bauwerkspflege erforderlich. Dazu zählt vor allem die Überprüfung, Säuberung und Reparatur aller wasserableitenden Systeme und Abdichtungen (Dachentwässerung, Drainagen/ Vertikalabdichtungen, Grundleitungen, Gesimse, Verdachungen usw.). In [121] werden regelmäßige und gründliche Bauwerksinspektionen zunächst im jährlichen Abstand, später wenn keine neuen Schäden auftreten, im zwei- bis dreijährigen Rhythmus. Außerdem wird empfohlen, verkürzte Instandsetzungszyklen bei Bauwerken aus gipshaltigem Mauerwerk einzuplanen. Der Planer sollte den Besitzer eines derartigen Objektes entsprechend informieren.

10 Ausblick

Innerhalb des Projektes wurden Injektionstechnologien für historisches Mauerwerk entwickelt und erfolgreich angewendet. Für den Spezialfall sulfathaltiges Mauerwerk wurden Injektionsmörtel und Injektionsschaummörtel formuliert. Während der Bearbeitung wurde deutlich, dass die Erstellung eines „Mörtels für alle Fälle“ nicht zielführend ist. Insbesondere bei sulfathaltigem Mauerwerk sind die Bedingungen im Bestand sehr genau zu definieren, um eine optimale Sanierung vornehmen zu können. Dazu zählen vor allem:

- Feuchtebedingungen im Mauerwerk und damit verbunden die Austrocknungsbedingungen nach der Sanierung
- Festigkeit des zu sanierenden Mauerwerks, abhängig von den verwendeten Materialien
- Größe der Hohlräume beziehungsweise Anomalien
- Vorhandensein mobiler Kat- und Anionen (Salzgehalt)

In Hinblick auf diese Einflussgrößen sind die Grundlagen für ein anwendbares Mörtelsystem entwickelt worden, welches einen schnellen Zugriff auf die optimale Materialkombination unter den jeweiligen konkreten Bedingungen des Objektes ermöglicht.

Für die Zukunft wird ein Mörtelhersteller gesucht, der dieses System in seine Produktpalette aufnimmt und für Spezialfälle im In- und Ausland zur Verfügung stellen kann.

11 Literatur

- [1] WTA-Arbeitsgruppe Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA-Merkblatt: „Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden“ Gelbdruck 08.2017/D
- [2] Sobott, R. & Meinhardt-Degen, J. (2008): Chemisch-mineralogische Untersuchungen an Mörtelproben im Rahmen des Turmrückbaus an der Kirche St. Nikolai in Eilenstedt – in: Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an Fassaden, WTA-Schriftreihe, Heft 30, S. 85-98.
- [3] ASTM C943-10: Standard Practice for Making Test Cylinders and Prisms for Determining Strength and Density of Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory. ASTM, 2010, inzwischen ersetzt durch ASTM C943-17, 2017
- [4] ASTM D 06910/06910M-09: Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries and API RP 138-1, ASTM 2009
- [5] Anstett, F. (1923): Titel nicht bekannt - in: La Revue des Matériaux de Construction et de Travaux. 162, 51 (Zitat aus Wittekind 1960, die Originalarbeit ist bisher nicht zugänglich)
- [6] Burkert, T (2012).: Instandsetzung und Ertüchtigung von Mauerwerk, Teil 10:
- [7] Hochwasserschutz-Ertüchtigung an historischen Mauerwerksgebäuden am Beispiel des historischen Gebäudeensembles der Stadt Grimma. In: Mauerwerk Kalender 37 (2012), S. 355–410. Hrsg. W. Jäger, Ernst & Sohn. Berlin.
- [8] DIN 52450 (1985): Prüfung anorganischer nichtmineralischer Baustoffe – Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Prüfkörpern – Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin
- [9] ECKART, A.; NEHRING, C. & ROMSTEDT, H. (2008): Kurzer Abriss zu Schadensmechanismen im gipshaltigen Mauerwerk – in: Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an Fassaden, WTA-Schriftreihe, Heft 30, S. 45-58.
- [10] Garrecht, H.; Nehring, C.; Wigger: Abschlussbericht zum FH3-Vorhaben: Untersuchung und Reduzierung der Treibmineralschäden an gipshaltigen Bauwerken – Verbundprojekt zwischen der Fachhochschule Erfurt, Hochschule Karlsruhe und Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, 2009, S. 1-149
- [11] Jäger, W.; Boekhoff, B.; Köberle, T.; Hohl, M.: Verpressen von historischem Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 41 (2016), hrsgg. v. W. Jäger, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 163 - 209
- [12] Kratzsch, J.: Übersicht Injektionsmörtel – in: Mauerwerk-Kalender 33 (2008), hrsgg. v. W. Jäger, Verlag Ernst & Sohn: Berlin, S. 151 - 167.
- [13] Locher, F. W.: Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung – Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf, 2000, S. 1 – 449.
- [14] Maus, H. (1988): Über die Anfänge der Technik des Verpressens von Zement bei Mauerwerksbauten. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahrbuch des SFB 315, 1987. Berlin 1988, S. 101-114

- [15] Maus, H. (1991): Zementinjektionen in historischem Mauerwerk. Ergebnisse der Untersuchung älterer Maßnahmen. In: Untersuchungen an Material und Konstruktion historischer Bauwerke, Arbeitshefte des SFB 315, Heft 10/1991. Karlsruhe 1991, S.30-31
- [16] Mohammed, M. H.; Pusch, R.; Knutsson, S. & Hellström, G. : Rheological properties of cement-based grouts determined by different techniques – Engineering, 6, 2014, S. 217-229.
- [17] Sander, M.: Ermittlung der Baustoffkenngrößen an Mörteln für die Sanierung von historischem Mauerwerk dargestellt am Beispiel von Injektionsmörtel. Seminararbeit „Sanierung historischer Bauwerke“, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Fakultät Architektur, TU Dresden 2009
- [18] Sobott, R. & Meinhardt-Degen, J.: Chemisch-mineralogische Untersuchungen an Mörtelproben im Rahmen des Turmrückbaus an der Kirche St. Nikolai in Eilenstedt – in: Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an Fassaden, WTA-Schriftreihe, Heft 30, 2008, S. 85-98.
- [19] Stark, J. & Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton – Verlag Springer Vieweg, Berlin Heidelberg 2013, S. 1–479.
- [20] Stürmer, S.: Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerks unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze – Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar. 1997, S. 1-251
- [21] Wittekind, W.: Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung – in: Zement-Kalk-Gips, Nr. 12, 1960, S. 565-572
- [22] Wittstock, J. : Sanierung historischen Mauerwerks; Einsatz zementfreier Injektionsmörtel – unveröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der TU Dresden 2015
- [23] Eckart, A., H. Dreuse, and C. Nehring, Nachuntersuchungen von Zementmörtelinjektionen im gipshaltigen Mauerwerk. WTA-Schriftenreihe. Vol. 30. 2008, Mainz: WTA-Schriftenreihe. 38-45.
- [24] Eckart, A., C. Nehring, and H. Romstedt, Kurzer Abriss zu Schadensmechanismen im gipshaltigen Mauerwerk, WTA-Schriftenreihe, Vol. 30. 2008, Mainz: WTA-Schriftenreihe. 45-58.
- [25] Zier, H.-W., Nachweis von Ursachen für Schäden im Mauerwerk mit gipshaltigen Mörteln nach Sanierungen mit hydraulischen Bindemitteln. WTA-Schriftenreihe, 2008. 30: p. 59-84.
- [26] Twelmeier, H., Dauerhaftigkeitsprognose der Verfüguung von gipshaltigem historischem Mauerwerk, 2011, TU Braunschweig: Braunschweig.
- [27] Twelmeier, H.; Budelmann, H.: Gipsmörtel und gipsverträgliche Mörtel im Praxistest in Lüneburg. In: , Mainz, S. IFS Bericht 2010: Instandsetzung gipshaltigen Mauerwerks - Neues aus Forschung und Praxis. Institut für Steinkonservierung E.V.: p. 105-116.
- [28] Twelmeier, H., Budelmann, H.; Dauerhaftigkeitsprognose der Verfüguung von gipshaltigen historischen Mauerwerk, 1. Weimarer Gipstagung 30./31.03.2011

- [29] Henning, O. and K.-G. Winkler, Probleme bei der Rekonstruktion und Reparatur von gipshaltigem Mauerwerk, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 1989. 35: p. 194-196.
- [30] RÜth, G., Schäden, Schutz- und Sicherungsmaßnahmen bei Bauwerken mit Gipsmörtel. Der Bautenschutz, 1932. Heft1(3.Jg.): p. 1 - 9.
- [31] RÜth, G., Schäden, Schutz- und Sicherungsmaßnahmen bei Bauwerken mit Gipsmörtel. Der Bautenschutz, 1932. Heft 3(3.Jg.): p. 25 - 36.
- [32] Bellmann, F., Zur Bildung des Minerals Thaumasit beim Sulfatangriff auf Beton. 2005, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde: Weimar. p. 97.
- [33] Nobst, P. and J. Stark. Grundlagenuntersuchungen zur Thaumasitbildung in Zementsteinpasten, in Ibausil. 2003, Weimar: Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar.
- [34] Breitenbücher, R., et al., eds. Sulfatangriff auf Beton. Sachstandsbericht Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, ed. D.A.f. Stahlbeton. 2006, Beuth Verlag: Berlin, Wien, Zürich.
- [35] Köhler, S., D. Heinz, and L. Urbonas, Effect of ettringite on thaumasite formation. Cement and Concrete Research, 2006, 36(4): p. 697-706.
- [36] Siebert, J., Betonkorrosion infolge kombinierten Säure-Sulfat-Angriffs bei Oxidation von Eisensulfiden im Baugrund, 2009, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften: Bochum.
- [37] Heinz, D. and L. Urbonas, About thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes and mortars—effect of heat treatment at 95 °C and storage at 5 °C. Cement and Concrete Composites, 2003. 25(8): p. 961-967.
- [38] Stark, J. and B. Wicht, Dauerhaftigkeit von Beton. 2001, Weimar: Birkhäuser Verlag Basel.
- [39] Collepardi, M., A state-of-art review on delayed ettringite attack on concrete. Cement and Concrete Composites, 2003. 25: p. 401-407.
- [40] Ghorab, H.Y., Thermische und chemische Stabilität der Calciumaluminatsulfathydrate. 1979, RWTH Aachen, Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen: Aachen.
- [41] Metha, P.K., Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete - Another Look. Cement and Concrete Research, 1983. 13: p. 401-406.
- [42] Taylor, H.F.W., C. Famy, and K.L. Scrivener, Delayed ettringite formation. Cement and Concrete Research, 2001, 31(5): p. 683-693.
- [43] Bensted, J., Thaumasite - background and nature in deterioration of cements, mortars and concrete. Cement and Concrete Composites, 1999. 21: p. 117-121.
- [44] Bensted, J., Thaumasite—direct, woodfordite and other possible formation routes. Cement and Concrete Composites, 2003. 25(8): p. 873-877.
- [45] Gao, X.M., Baoguo; Yang, Yingzi; Su, Anshuang, Sulfate Attack of Cement-Based Material with Limestone Filler Exposed to Different Environments. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(4)(Springer): p. 543-549.

- [46] Lothenbach, B., et al., Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(6): p. 848-860.
- [47] Pipilikaki, P., et al., The effect of temperature on thaumasite formation. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(10): p. 964-969.
- [48] Schmidt, T., et al., Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(12): p. 1111-1121.
- [49] Schmidt, T.L., Barbara; Romer, Michael; Scrivener, Karen; Rentsch, Daniel; Figi, Renato, A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(3)(Elsevier Ltd): p. 337-349.
- [50] Taylor, H.F.W., *Cement chemistry*. 1997, Lonon Telford Publ.
- [51] Scrivener, K.L. and A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(7): p. 651-665.
- [52] Glasser, F.P., The role of sulfate mineralogy and cure temperature in delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Composites*, 1996, 18(3): p. 187-193.
- [53] Glasser, F.P., A. Kindness, and S.A. Stronach, Stability and solubility relationships in AFm phases: Part I. Chloride, sulfate and hydroxide. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(6): p. 861-866.
- [54] Glasser, F.P., J. Marchand, and E. Samson, Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(2): p. 226-246.
- [55] Damidot, D. and F.P. Glasser, Investigation of the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system at 25 °C by thermodynamic calculations, *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(1): p. 22-28.
- [56] Collepardi, M., Thaumasite formation and deterioration in historic buildings. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21: p. 147-154.
- [57] Odler, I. and J. Colán-Subauste, Investigations on cement expansion associated with ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(5): p. 731-735.
- [58] Group, T.E., *The thaumasite form of sulfate attack: Risks, diagnosis, remedial works and guidance on new konstruktion*. 1999: London.
- [59] Stark, J., et al., Sulfatangriff auf Beton. Schriftenreihe des F. A. Fingerinstitut für Baustoffkunde, ed. F.A.F.f. Baustoffkunde, 2010, Weimar.
- [60] Ludwig, H.-M. and J. Stark, Umwandlung von Hydratphasen bei tiefen Temperaturen. *Zement Kalk Gips*, 1993, 2(46): p. 90-94.
- [61] Bollmann, K., *Ettringitbildung in nichtwärmebehandelten Betonen*. 2000, Bauhaus Universität Weimar: Weimar.
- [62] Nobst, P. and J. Stark, Investigations on the influence of cement type on thaumasite formation. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(8): p. 899-906.
- [63] Bellmann, F., On the formation of thaumasite CaSiO₃·CaSO₄·CaCO₃·15H₂O: Part III. *Advances in Cement Research*, 2007, 19(4): p. 139-146.

- [64] Bellmann, F., On the formation of thaumasite, *Advances in Cement Research*, 2004. 16(3): p. 89-94.
- [65] Bellmann, F. and J. Bensted, Discussion: On the formation of thaumasite $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$: Part II. *Advances in Cement Research*, 2006. 18(3): p. 129-134.
- [66] Bellmann, F. and J. Stark. Ein Beitrag zum Chemismus der Thaumasitbildung. in *Ibausil*. 2003, Weimar: Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar.
- [67] Bellmann, F., W. Erfurt, and J. Stark, Gefährdungspotential der betonschädigenden Thaumasitbildung, ed. F.A.F.-I.f.B.a.d.B.-U. Weimar. 2010, Weimar.
- [68] Mulenga, D.M., Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumasitbildung. 2002, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Finger-Institut für Baustoffkunde: Weimar.
- [69] Pöllmann, H. The both sides of Ettringites (AFt) - a mineral with different properties. in 32nd international Conference on Cement Microscopy 2010. 2010. New Orleans, Louisiana, USA: International Cement Microscopy Association.
- [70] Götz-Neunhoeffler, F. and J. Neubauer, Refined ettringite structure for quantification of hydration in cementpastes, in 12th International Congress on the Chemistry of Cement. 2007, ICC: Montreal.
- [71] Neubauer, J., F. Bernhardt, and F. Götz-Neunhoeffler. Auswirkung von Calciumsulfaten auf das Hydratationsverhalten der Ferratphase, in 1. Weimarer Gipstagung. 2011. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde.
- [72] Eckart, A., Besonderheiten in Thüringen - gipshaltiges Mauerwerk, Quadratmeter, *Zeitschrift der Fachhochschule Erfurt*, 2004.
- [73] Henning, O. and K.G. Winkler, Gipshaltige Mörtel und Gipsrohsteine- Schäden bei falschem Reparaturmaterial, *Das Bauzentrum*, 1991: p. 26-29.
- [74] Stürmer, S., Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerks unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze. 1997, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Finger-Institut für Baustoffkunde: Weimar. p. 237.
- [75] Eckart, A.N., Christel, "Nachuntersuchung von konstruktiven Sicherungsmaßnahmen mit zementhaltigen Injektionsmaterialien an gipshaltigen Mauerwerksbauten in Thüringen". 2004, Fachhochschule Erfurt, Institut für Steinkonservierung Mainz.
- [76] Mielke, I., Sanierungsfall Schloss Wiehe / Thüringen Thaumasit auch ein Problem in der Denkmalpflege. Thesis, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar*, 2003: p. 23-28.
- [77] Bennert, W., Den Abriss vermeiden. Thesis, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar*, 2003. 5: p. 14-21.
- [78] Schubert, T., Untersuchungen zum Umgang mit dem Verpressschaden am Schloss Wiehe. 2004, Bauhaus Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde: Weimar.
- [79] Dreuse, H. and C. Nehring, "Nachuntersuchungen von konstruktiven Sicherungsmaßnahmen mit zementhaltigen Injektionsmaterialien an gipshaltigen Mauerwerksbauten in Thüringen". 2005, Fachhochschule Erfurt: Erfurt. p. 1-70.

- [80] DIN EN 197-1:2011-11: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- [81] Weber, J.; Gadermayr, N., "Materialwissenschaftliche Charakterisierung von Romazementen des 19. Jahrhunderts"; EU-Projekte ROCEM und ROCARE; Innsbruck, University Press, 2007 Naturwissenschaft & Denkmalpflege
- [82] Schwarz, W.; „Production of European Roman cements: history and the situation today; Natural cements in European cultural heritage: history, applications and conservation“ ICOMOS 26.-27. April 2012 in Paris, France
- [83] Chemischer Angriff auf Beton - Empfehlungen zur Prüfung und Bewertung; DBV-Merkblatt-Sammlung / Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.; Merkblätter / Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. Verlag DBV, 2017
- [84] Dreuse, H., Zier, H.-W.: Praktische Erfahrungen im Umgang mit Prüfmethoden zur Ermittlung des Sulfatwiderstandes hydraulischer Bindemittel, Internationale Baustoff und Silikattagung Ibausil, Weimar 2015
- [85] Dreuse, H.: Praktische Erfahrungen im Umgang mit Prüfmethoden zur Ermittlung des Sulfatwiderstandes hydraulischer Bindemittel, WTA-Schriftenreihe , Heft 30, S. 99-110, 2008
- [86] Zier, H.-W., Dreuse, H.: Gips und Zement/ Gips und Holz – Probleme bei Sanierungsmaßnahmen?, IFS-Bericht Heft 42, S. 81-96, 2012
- [87] DIN EN 13279-2 Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel – Teil2 Prüfverfahren 2004
- [88] Nowak, S., Alterung von Calciumsulfatphasen, Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, 2012
- [89] Bundesverband der Gipsindustrie: Gipsdatenbuch, Bundesverband der Gipsindustrie e.V.; Kochstraße 6-7, 10969 Berlin
- [90] Schöps, P.: Interne Aktennotiz zu Quellen von Gipsmörtel, Jäger Ingenieure GmbH 2018
- [91] Tesch, V.: Gefügeoptimierte Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat-Basis für die Anwendung im Außenbereich; Dissertation an der Universität Kassel, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2007
- [92] Stark, J., Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, SpringerVieweg, 2. Auflage 2013, Berlin, Heidelberg
- [93] Jäger, W., Boekhoff, B., Köberle, T., Hohl, M.: Verpressen von historischem Mauerwerk, Mauerwerk Kalender 2016 (41), S. 163-209, Verlag Wilhelm Ernst Sohn Berlin
- [94] DIN EN 1771: 2004-11: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken Prüfverfahren - Bestimmung der Injektionsfähigkeit und Prüfung der Spaltzugfestigkeit
- [95] DAfStb 09/1989: Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton
- [96] DIN EN 13369: 2004-09: Allgemeine Regeln für Betonfertigteile
- [97] DIN EN 13230-1: 2009-10: Bahnanwendungen – Oberbau; Gleis- und Weichenschwellen aus Beton, Teil 1: Allgemeine Anforderungen

- [98] Anwendung der Normenreihe DIN EN 13 230 mit den zugehörigen Anwendungsregeln und Ergänzungen der DB AG: DBS 918 143:03/2010: Gleis- und Weichenschwellen aus Beton für Schotteroberbau (Scho) und Feste Fahrbahn (FF)
- [99] Jorne, F., Henriques, F.M.A.; Baltazar, L.G.: Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media – in: Materials and Structures, No. 48, 2015, S. 2211-2233
- [100] Uranjek, M.; Žarnić, R.; Bosiljkov, V.: Strengthening of Heritage Buildings by Means of Grout Injection – Problems and Solutions – in: Proceedings 2nd Historic Mortar Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, Prague, Czech Republic, 2010, S. 769-777
- [101] Beril Biçer-Simsir, Leslie Rainer: Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces A Manual of Laboratory and Field Test Methods; 2013 J. Paul Getty Trust
- [102] ASTM C943 – 10: Standard Practice for Making Test Cylinders and Prisms for Determining Strength and Density of Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory; ASTM International, 06/15/2010
- [103] DIN EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch); Deutsche Fassung EN 1015-3:1999+A1:2004+A2:2006
- [104] ASTM D 06910/06910M (2009): Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries and API RP 138-1
- [105] DIN EN 445:2008-01: Einpressmörtel für Spannglieder - Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 445:2007
- [106] DIN 52450 1985-08: Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe; Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern,
- [107] ASTM C 452-02: Standard Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfat
- [108] DIN 1164-10 2013-03: Zement mit besonderen Eigenschaften - Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt
- [109] Gigla, B.: Instandsetzen und Ertüchtigen von Mauerwerk. Teil 5: Vernadeln, Verankern (Berechnung). In: Mauerwerk-Kalender 39 (2014) S. 199–230. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.
- [110] Hamdan, A.: Ertüchtigung von historischem Mauerwerk mit Verpressankern in erdbebengefährdeten Gebieten. Diss. In: Bauforschung und Baupraxis. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Tragwerksplanung, H. 9. Eigenverlag, Dresden 2011.
- [111] Wenzel, F.; Maus, H.: Nachuntersuchung an ingenieurmäßig sanierten Mauerwerksbauten. Erster Zwischenbericht. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Baugefüge, Konstruktionen, Werkstoffe. SFB 315 Universität Karlsruhe (TH). Jahrbuch 1986. Ernst & Sohn, Berlin 1986, S. 211–221.
- [112] Faller, A.; Karotke, E.; Althaus, E.: Zur Dauerhaftigkeit von Mauerwerks-Sanierungen. Untersuchungen an Verpreßmaterial um Nadeln und Zuganker bei sanierten historischen Bauwerken. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Baugefüge,

- Konstruktionen, Werkstoffe. SFB 315 Universität Karlsruhe (TH). Jahrbuch 1988. Ernst & Sohn, Berlin 1988, S. 157–164.
- [113] Imprägnierung von Mauerwerk bei Befall durch den echten Hausschwamm
http://www.holzfragen.de/seiten/hausschwamm_bekaempfung.html Aufruf
16.01.2016
- [114] WTA Merkblatt 4-10-15/D Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte von mineralischen Baustoffen. <http://www.wta-international.org/> Aufruf 15.01.2019. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Pfaffenhofen 2015
- [115] Horizontalabdichtung. Nachträgliche Injektion gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit. http://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/Unternehmen/Fachprospekte/DE_SOI_Horizontalabdichtung.pdf
- [116] DIN 1053-1:1996-11 Mauerwerk. Teil 1: Berechnung und Ausführung. NABau im DIN, Berlin 1996
- [117] DIN EN 1961-1-1/NA:2012 Nationaler Anhang National festgelegte Parameter Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1 1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. NABau im DIN, Berlin 2012+ A1:21014-03
- [118] WTA-Merkblatt 4-5-99/D Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik
- [119] WTA-Merkblatt 7-1-18/D Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit
- [120] WTA-Merkblatt 4-11-16/D Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte von mineralischen Baustoffen
- [121] WTA-Merkblatt 2-11-18/D Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden
- [122] Nodoushani, M.: Verpressen und Injizieren von Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 33 (2008), S. 319–328. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.
- [123] Backe, H.: Wissensspeicher Baustoffe. 7. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin 1977
- [124] DIN EN 1996-1-1:2013-02: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1 1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996 1 1:2005+A1:2012. NABau im DIN, Berlin 2013.
- [125] Rustmeier, H. G.: Untersuchungen über Einflüsse auf die Drucktragfähigkeit von Bruchsteinmauerwerk. Diss. TH Darmstadt, Darmstadt 1982.
- [126] Horizontalabdichtung. Nachträgliche Injektion gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit. http://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/Unternehmen/Fachprospekte/DE_SOI_Horizontalabdichtung.pdf



Fakultät Architektur Lehrstuhl Tragwerksplanung

C:\Users\vaeckart\Documents\14-61406-IngMa-Schaummoertel\06-Bericht\End\04-Text\Endfassung\19-01-31-Endbericht-IngMa-e.docx

Anhang

Rezepturen der Gipsmörtelmischungen

	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gipsmörtel 1		Gipsmörtel 2		Gipsmörtel 3		Gipsmörtel 4		Gipsmörtel 4A		Gipsmörtel 4B		Gipsmörtel 5		Gipsmörtel 6	
Summe/Soli %	100,00	2,00	100,00	2,00	100,00	0,05	100,08	0,05	100,00	0,05	100,00	0,05	100,00	0,05	100,00	0,05
Gips Casea Ellrich HGE	100	2,0000														
Gips Casea Ellrich HGEA			100	2000,0000												
Rostbandgips Knauf Estrich					100,00	50,00							97,00	48,50	77,00	38,50
ß-HH Knauf Naturstuck															20,00	10,00
α-HH Knauf																
HBG Knauf Rottleberode							97,00	48,50	100,00	50,00	97,00	48,50				
Tradical HH							3,00	1,50	0,00	0,00	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50
Tradical HM	0,0	0,0000		0,0000												
Summe Bindemittel	100	2	100	2000	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00
Retardan 2025 P [g]						0,0	0,080	0,0400								
Retardan 200P																
Seignettesalz																
Viscocrete 510 Sika																
Melflux																
Walocel MT 400 PFV																
K1/K3																
(K1+K3)/H2O																
Mörtel Schaum																
Aluminiumpulver RO 260																
Aluminiumpulver RO 560																
Werte																
Wasser zw. [g/50g]																
Wasser	20,00	400,0	20,00	400,0	60,00	30,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	25,00	60,00	30,00	60,00	30,00
w/Bm Wert	0,20		0,20		0,6		0,5		0,5		0,5		0,6		0,6	

	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gipsmörtel 7		Gipsmörtel 8		Gipsmörtel 9		Gipsmörtel 10		Gipsmörtel 11		Gipsmörtel 12		Gipsmörtel 13		Gipsmörtel 14	
Summe/Soll %	100,00	0,05	100,02	1,50	100,08	0,05	100,08	0,05	100,08	0,05	100,00	0,05	100,00	0,05	100,01	0,05
Gips Casea Ellrich HGE																
Gips Casea Ellrich HGEA																
Rostbandgips Knauf Estrich					97,00	48,50	77,00	38,50							77,00	38,50
ß-HH Knauf Naturstuck	48,50	24,25	48,50	727,50			20,00	10,00	48,50	24,25	20,00	10,00	77,00	38,50	20,00	10,00
α-HH Knauf	48,50	24,25	48,50	727,50					48,50	24,25	77,00	38,50	20,00	10,00		
HBG Knauf Rottleberode																
Tradical HH	3,00	1,50	3,00	45,00	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50
Tradical HM																
Summe Bindemittel	100,00	50,00	100,00	1500,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50	100	50
Retardan 2025 P [g]					0,080	0,0400	0,080	0,0400	0,080	0,0400						
Retardan 200P			0,020	0,3												
Seignettesalz															0,010	0,0050
Viscocrete 510 Sika																
Melflux																
Walocel MT 400 PFV																
K1/K3																
(K1+K3)/H2O																
Mörtel-Schaum																
Aluminiumpulver RO 260																
Aluminiumpulver RO 560																
Werte																
Wasser zw. [g/50g]																
Wasser	50,00	25,00	50,00	25,00							60,00	30,00	60,00	30,00	60,00	30,00
w/Bm Wert	0,5		0,5								0,6		0,6		0,6	

	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gips-Kalk-Mörtel 15		Gipsmörtel 16		Gipsmörtel 17		Gipsmörtel 18		Gipsmörtel 19		Gipsmörtel 10 A		Gipsmörtel 18 A		Gipsmörtel 20		Gipsmörtel 21	
Summe/Soll %	100,05	0,05	100,01	0,05	100,05	0,05	100,01	0,05	100,02	1,00	100,02	1,00	100,02	1,50	100,08	1,50	100,02	1,50
Gips Casea Ellrich HGE																		
Gips Casea Ellrich HGEA																		
Rostbandgips Knauf Estrich	77,00	38,50									77,00	770,00			77,00	1155,00		
ß-HH Knauf Naturstuck	20,00	10,00									20,00	200,00			20,00	300,00		
α-HH Knauf							48,50	24,25					48,50	727,50			48,50	727,50
HBG Knauf Rottleberode			97,00	48,50	97,00	48,50	48,50	24,25	97,00	970,00			48,50	727,50			48,50	727,50
Tradical HH	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	30,00	3,00	30,00	3,00	45,00	3,00	45,00	3,00	45,00
Tradical HM																		
Summe Bindemittel	100	50	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1500,00	100,00	1500,00	100,00	1500,00
Retardan 2025 P [g]															0,080	1,2000		
Retardan 200P																		
Seignettesalz	0,050	0,0250	0,010	0,0050	0,050	0,0250	0,010	0,0050	0,020	0,2000	0,020	0,2000	0,020	0,3000			0,020	0,3000
Viscocrete 510 Sika																		
Melflux																		
Walocel MT 400 PFV																		
K1/K3									10:120g K1 2g K3						1:10		1:10	
(K1+K3)/H2O									(1:10)/6 132g H2O						(1:10)/6		(1:10)/6	
Mörtel: Schaum									1:1						1:1		1:1	
Aluminiumpulver RO 260																		
Aluminiumpulver RO 560																		
Werte																		
Wasser zw. [g/50g]																		
Wasser	60,00	30,00	60,00	30,00	60,00	30,00	50,00	25,00	60,00	600,00	60,00	600,00	50,00	750,00	50,00	750,00	50,00	750,00
w/Bm Wert	0,6		0,6		0,6		0,5		0,6		0,6		0,5		0,5		0,5	

	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gipsmörtel 22 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 23 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 24 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 25 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 26 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 27 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 29	
Summe/Soll %	100,22	1,50	100,22	1,50	100,01	0,05	100,01	0,05	100,01	0,05	100,01	0,05	100,01	1,50
Gips Casea Ellrich HGE														
Gips Casea Ellrich HGEA														
Rostbandgips Knauf Estrich														
β-HH Knauf Naturstuck	48,50	727,50	48,50	727,50	48,50	24,25	48,50	24,25	48,50	24,25	48,50	24,25	48,50	727,50
α-HH Knauf	48,50	727,50	48,50	727,50	48,50	24,25	48,50	24,25	48,50	24,25	48,50	24,25		0,00
HBG Knauf Rottleberode													48,50	
Tradical HH	3,00	45,00	3,00	45,00	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	1,50	3,00	45,00
Tradical HM														
Summe Bindemittel	100,00	1500,00	100,00	1500,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	772,50
Retardan 2025 P [g]														
Retardan 200P														
Seignettesalz	0,020	0,3000	0,020	0,3000	0,010	0,0050	0,010	0,0050	0,010	0,0050	0,010	0,0050	0,010	0,1500
Viscocrete 510 Sika														
Melflux	0,200	3,0000	0,200	3,0000										
Walocel MT 400 PFV														
K1/K3			10:1	20g K1 2g K3										
(K1+K3)/H2O			(1:10)/6	132g H2O										
Mörtel-Schaum			1:1											
Aluminiumpulver RO 260					0,100	0,0500			2,000	1,0000				
Aluminiumpulver RO 560							0,100				2,000	1,0000		
Werte														
Wasser zw. [g/50g]														
Wasser	50,00	750,00	50,00	750,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	750,00
w/Bm Wert	0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5	

	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gipsmörtel 30		Gipsmörtel 31		Gipsmörtel 32		Gipsmörtel 33		Gipsmörtel 34		Gipsmörtel 35 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 36 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 37 (mod. GM 8)	
Summe/Soll %	100,01	1,50	100,41	1,50	100,01	1,50	100,41	0,05	100,01	1,50	100,41	1,50	100,01	0,05	100,01	0,05
Gips Casea Elirich HGE																
Gips Casea Elirich HGEA																
Rostbandgips Knauf Estrich																
β-HH Knauf Naturstuck	48,50	727,50	10,00	150,00	10,00	150,00	10,00	5,00	10,00	150,00	48,50	727,50	48,50	24,25	47,50	23,75
α-HH Knauf		0,00	27,00	405,00	27,00	405,00	27,00	13,50	27,00	405,00	48,50	727,50	48,50	24,25	47,50	23,75
HBG Knauf Rottleberode	48,50		60,00	900,00	60,00		60,00	30,00	60,00							
Tradical HH	3,00	45,00	3,00	45,00	3,00	45,00			3,00	45,00	3,00	45,00	3,00	1,50	5,00	2,50
Tradical HM							3,00	1,50								
Summe Bindemittel	100,00	772,50	100,00	1500,00	100,00	600,00	100,00	50,00	100,00	600,00	100,00	1500,00	100,00	50,00	100,00	50,00
Retardan 2025 P [g]																
Retardan 200P																
Seignettesalz	0,010	0,1500	0,010	0,1500	0,010	0,1500	0,010	0,0050	0,010	0,1500	0,010	0,1500	0,010	0,0050	0,010	0,0050
Viscocrete 510 Sika			0,250	3,7500			0,250	0,1250			0,250	3,7500				
Melflux																
Walocel MT 400 PFV			0,150	2,2500			0,150	0,0750			0,150	2,2500				
K1/K3	10:1	20g K1 2g K3							10:1	20g K1 2g K3						
(K1+K3)/H2O	(1:10)/6	132g H2O							(1:10)/6							
Mörtel-Schaum	1:1				1:1 LP MC				1:1							
Aluminiumpulver RO 260					155 3%											
Aluminiumpulver RO 560																
Werte																
Wasser zw. [g/50g]																
Wasser	50,00	750,00	40,00	600,00	40,00	600,00	40,00	20,00	40,00	600,00	36,00	540,00	50,00	25,00	50,00	25,00
w/Bm Wert	0,5		0,4		0,4		0,4		0,4		0,36		0,5		0,5	

	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gipsmörtel 38 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 39 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 40 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 41 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 42 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 43 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 44 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 45 (mod. GM 8)	
Summe/Soll %	100,01	0,05	100,01	0,05	100,01	0,05	100,01	0,05	100,01	0,05	100,01	1,00	100,41	1,00	100,41	1,00
Gips Casea Elrich HGE																
Gips Casea Elrich HGEA																
Rostbandgips Knauf Estrich																
ß-HH Knauf Naturstuck	45,00	22,50	40,00	20,00	48,50	24,25	47,50	23,75	45,00	22,50	40,00	400,00	48,50	485,00	48,50	485,00
α-HH Knauf	45,00	22,50	40,00	20,00	48,50	24,25	47,50	23,75	45,00	22,50	40,00	400,00	48,50	485,00	48,50	485,00
HBG Knauf Rottleberode																
Tradical HH	10,00	5,00	20,00	10,00									3,00	30,00	3,00	30,00
Tradical HM					3,00	1,50	5,00	2,50	10,00	5,00	20,00	200,00				
Summe Bindemittel	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00
Retardan 2025 P [g]																
Retardan 200P																
Seignettesalz	0,010	0,0050	0,010	0,0050	0,010	0,0050	0,010	0,0050	0,010	0,0050	0,010	0,1000	0,010	0,1000	0,010	0,1000
Viscocrete 510 Sika													0,250	2,5000	0,250	2,5000
Melflux																
Walocel MT 400 PFV													0,150	1,5000	0,150	1,5000
K1/K3													10:1	20g K1 2g K3	1:1 LP MC	
(K1+K3)/H2O													(1:10)/6		155 3%	
Mörtel-Schaum													1:1		1:1	
Aluminiumpulver RO 260																
Aluminiumpulver RO 560																
Werte																
Wasser zw. [g/50g]																
Wasser	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00	500,00	36,00	360,00	36,00	360,00
w/Bm Wert	0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,36		0,36	

	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gipsmörtel 46 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 47 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 48 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 49		Gipsmörtel 50A		Gipsmörtel 50B		Gipsmörtel 51		Gipsmörtel 52	
Summe/Soll %	100,41	1,00	100,41	1,00	100,41	1,00	100,01	1,50	100,01	1,50	100,02	1,00	100,02	1,50	100,00	1,50
Gips Casea Ellrich HGE																
Gips Casea Ellrich HGEA																
Rostbandgips Knauf Estrich																
ß-HH Knauf Naturstuck	48,50	485,00	48,50	485,00	48,50	485,00	48,50	727,50	40,00	600,00	40,00	400,00	45,00	675,00	48,50	727,50
α-HH Knauf	48,50	485,00	48,50	485,00	48,50	485,00	48,50	727,50	40,00	600,00	40,00	400,00	45,00	675,00	48,50	727,50
HBG Knauf Rottleberode																
Tradical HH	3,00	30,00	3,00	30,00	3,00	30,00	3,00	45,00	20,00	300,00	20,00	200,00	10,00	150,00	3,00	45,00
Tradical HM																
Summe Bindemittel	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1500,00	100,00	1500,00	100,00	1000,00	100,00	1500,00	100,00	1500,00
Retardan 2025 P [g]																
Retardan 200P																
Seignettesalz	0,010	0,1000	0,010	0,1000	0,010	0,1000	0,010	0,1500	0,010	0,1500	0,020	0,2000	0,020	0,3000		
Viscocrete 510 Sika	0,250	2,5000	0,250	2,5000	0,250	2,5000										
Melflux																
Walocel MT 400 PFV	0,150	1,5000	0,150	1,5000	0,150	1,5000										
K1/K3	1:1 LP MC		10:1	20g K1 2g K3	10:1	20g K1 2g K3									10:1	20g K1 2g K3
(K1+K3)/H2O	Oxal 3%		(1:10)/6		(1:10)/6										(1:10)/6	132g H2O
Mörtel Schaum	1:1		1:0,8		1:0,5										1:0,8	
Aluminiumpulver RO 260																
Aluminiumpulver RO 560																
Werte																
Wasser zw. [g/50g]																
Wasser	36,00	360,00	36,00	360,00	36,00	360,00	687,09		850,00		600,00		724,20		36,00	540,00
w/Bm Wert	0,36		0,36		0,36		0,46		0,57		0,6		0,48		0,36	



	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]	[M.-%]	[kg]
	Gipsmörtel 53 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 54 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 55 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 56 (mod. GM 8)		Gipsmörtel 57(mod. GM 8)	
Summe/Soll %	100,01	1,50	100,02	1,50	100,27	1,00	100,15	1,00	100,27	1,00
Gips Casea Ellrich HGE										
Gips Casea Ellrich HGEA										
Rostbandgips Knauf Estrich										
ß-HH Knauf Naturstuck	48,50	727,50	48,50	727,50	40,00	400,00	40,00	400,00	35,00	350,00
α-HH Knauf	48,50	727,50	48,50	727,50	40,00	400,00	40,00	400,00	35,00	350,00
HBG Knauf Rottleberode										
Tradical HH	3,00	45,00	3,00	45,00	20,00	200,00	20,00	200,00	30,00	300,00
Tradical HM										
Summe Bindemittel	100,00	1500,00	100,00	1500,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00
Retardan 2025 P [g]										
Retardan 200P										
Seignettesalz	0,010	0,1500	0,020	0,3000	0,020	0,2000	0,020	0,2000	0,020	0,2000
Viscocrete 510 Sika					0,250	2,5000	0,125	1,2500	0,250	2,5000
Melflux										
Walocel MT 400 PFV										
K1/K3	10:1	20g K1 2g K3	10:1	20g K1 2g K3						
(K1+K3)/H2O	(1:10)/6	132g H2O	(1:10)/6	132g H2O						
Mörtel Schaum	1:1		1:1	1:1						
Aluminiumpulver RO 260										
Aluminiumpulver RO 560										
Werte										
Wasser zw. [g/50g]										
Wasser	53,00	795,00	54,00	810,00	50,00	500,00	50,00	500,00	50,00	500,00
w/Bm Wert			0,54		0,5		0,5		0,5	

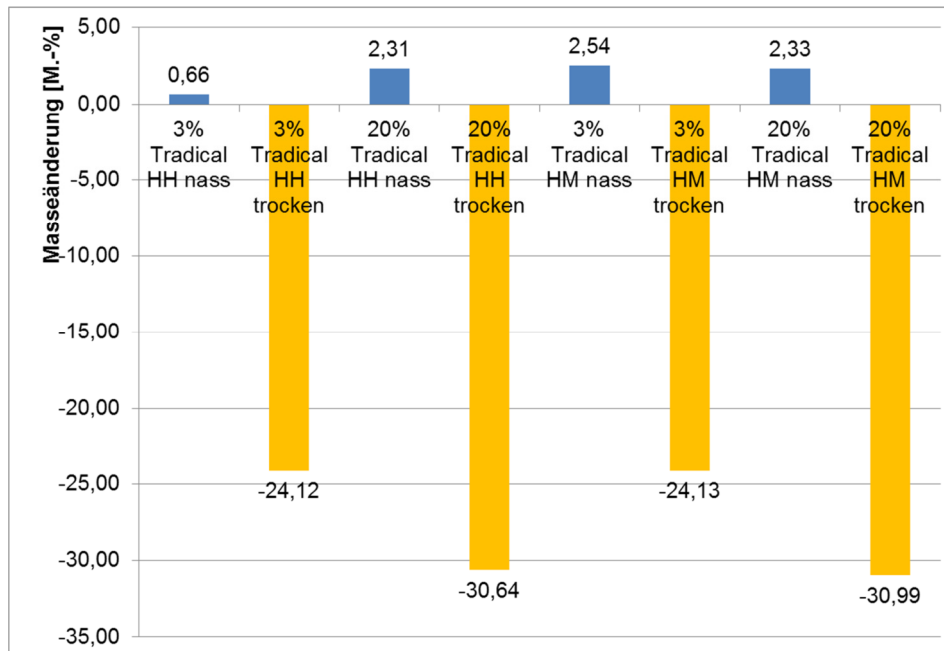


Bild 118 *Masseänderungen der kalkmodifizierten Mischungen nach 14 Tagen*

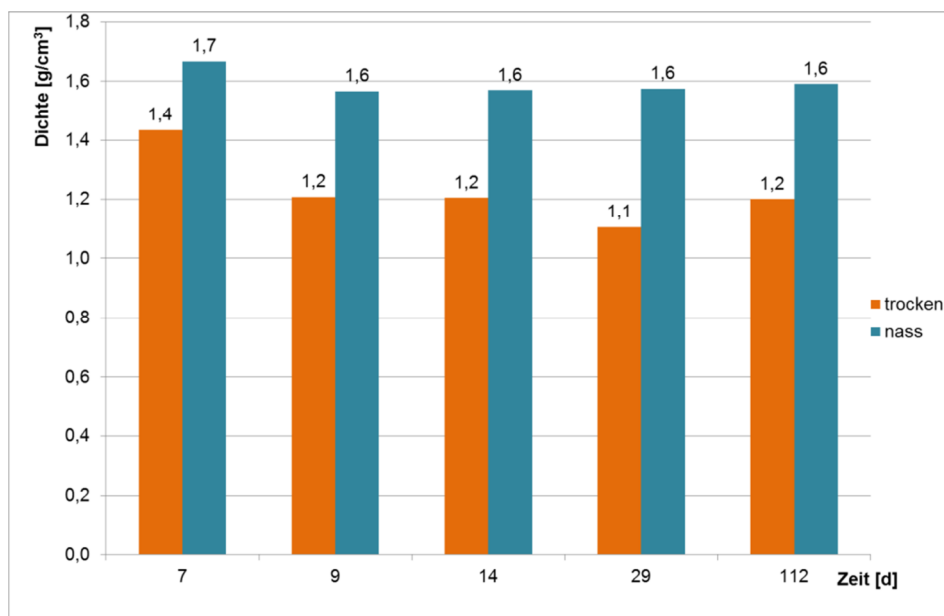


Bild 119 *Dichte der CASEA-HGE-Schaummörtelmischungen*

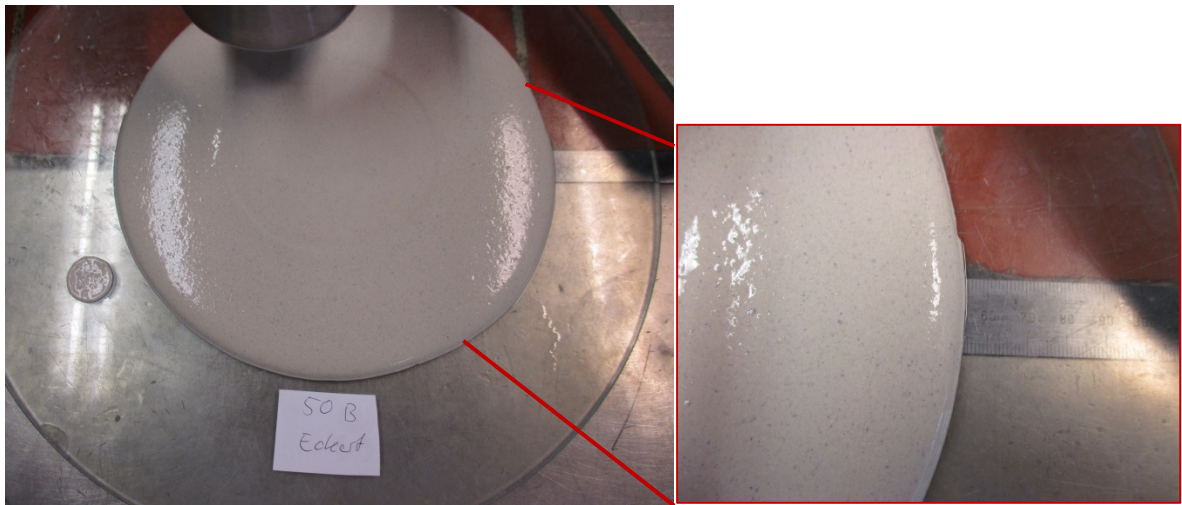


Bild 120 *Fließmaß der Mischung GM 50B von 255mm*