

Untersuchung und Entwicklung von Gipsmörteln für den
Außenbereich unter besonderer Berücksichtigung der
Wasserresistenz

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Chem. Petra Arens
aus Finnentrop

eingereicht beim Fachbereich 8
der Universität-Gesamthochschule Siegen

Siegen 2002

Eingereicht:	Februar 2002
Tag der mündlichen Prüfung:	25.06.2002
1. Gutachter:	Prof. Dr. D. Knöfel
2. Gutachter:	Prof. Dr. J. Stark

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Institut für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-Gesamthochschule Siegen unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. D. Knöfel. Für die Vergabe des interessanten Themas und für seine umfassende Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit möchte ich Ihm an dieser Stelle meinen besonderen Dank aussprechen.

Herrn Prof. Dr. Stark und Herrn Prof. Dr. H. Haeuseler danke ich für Ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Herrn B. Danzenbächer, Frau F. Doostdar, Frau I. Hommel, Frau A. Michel und Herrn R. Müller danke ich für die gute Zusammenarbeit und ihre Mithilfe beim praktischen Teil der Arbeit.

Mein großer Dank gilt weiterhin allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe für Bau- und Werkstoffchemie für Ihre Hilfsbereitschaft und das stets harmonische Betriebsklima.

Besonders gedankt sei an dieser Stelle Herrn Dr. K.G. Böttger, Herrn Dr. F. Winnefeld und Herrn S. Henkel, für Ihre hilfreichen Diskussionen sowie Frau L. Donner für die Unterstützung in Fragen der Verwaltung.

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, sowie der Evangelisch-lutherischen Landeskirche Hannovers danke ich für die finanzielle Förderung dieser Arbeit.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinen Eltern bedanken, die mich während des Studiums und der Promotion stets in allen Belangen unterstützt haben.

Nicht zuletzt danke ich meinem Freund Günter Pees, der mich bei der Durchführung dieser Arbeit moralisch unterstützt und ermuntert hat.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	DER BAUSTOFF GIPS – STOFFLICHE GRUNDLAGEN	1
1.2	HISTORISCHE GIPSMÖRTEL.....	5
1.3	WASSERRESISTENZ VON GIPSBAUSTOFFEN	7
1.3.1	<i>Schäden an Gipsbaustoffen im Außenbereich</i>	<i>7</i>
1.3.2	<i>Untersuchung der Wasserresistenz</i>	<i>7</i>
1.3.3	<i>Erhöhung der Wasserresistenz.....</i>	<i>8</i>
1.4	ZIELSETZUNG	10
2	UNTERSUCHUNGSMETHODEN	12
2.1	CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE	12
2.1.1	<i>Reindichte.....</i>	<i>12</i>
2.1.2	<i>Spezifische Oberfläche nach Blaine</i>	<i>12</i>
2.1.3	<i>Korngrößenverteilung</i>	<i>12</i>
2.1.4	<i>Qualitative Phasenanalyse.....</i>	<i>12</i>
2.2	FRISCHMÖRTELUNTERSUCHUNGEN	13
2.2.1	<i>Herstellung der Frischmörtel.....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Konsistenz und Wasser/Bindemittel-Wert</i>	<i>13</i>
2.2.3	<i>Versteifungsbeginn/Verarbeitbarkeitszeit</i>	<i>13</i>
2.2.4	<i>Wasserrückhaltevermögen</i>	<i>13</i>
2.2.5	<i>Rohdichte und Luftgehalt</i>	<i>13</i>
2.3	FESTMÖRTELUNTERSUCHUNGEN	14
2.3.1	<i>Dynamischer Elastizitätsmodul.....</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>Biegezugfestigkeit.....</i>	<i>14</i>
2.3.3	<i>Druckfestigkeit</i>	<i>14</i>
2.3.4	<i>Quellen/Schwinden.....</i>	<i>14</i>
2.3.5	<i>Wasseraufnahme</i>	<i>15</i>
2.3.6	<i>Widerstand gegen Frosttauwechsel.....</i>	<i>15</i>
2.3.7	<i>Rasterelektronenmikroskopie</i>	<i>15</i>
2.3.8	<i>Porosität und Porenradienverteilung.....</i>	<i>15</i>
2.4	UNTERSUCHUNG HISTORISCHEN PROBENMATERIALS	16
2.4.1	<i>Qualitative Analysemethoden.....</i>	<i>16</i>
2.4.2	<i>Quantitative Analysemethoden.....</i>	<i>17</i>
2.5	WASSERRESISTENZ.....	18
2.5.1	<i>Lagerung/Methoden im Rahmen der Prüfung der Wasserresistenz.....</i>	<i>19</i>
2.5.2	<i>Durchgeführte Untersuchungen während der Feucht- bzw. Wechsellagerungen.....</i>	<i>21</i>
3	UNTERSUCHUNG HISTORISCHEN MATERIALS	22
3.1	BEPROBTE BAUWERKE	23

3.1.1	<i>Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde</i>	23
3.1.2	<i>St. Cyriaci-Kirche in Dorste</i>	24
3.2	CHEMISCH-MINERALOGISCHE KENNWERTE DER HISTORISCHEN MÖRTEL	25
3.3	PHYSIKALISCH-MECHANISCHE UND HYGRISCHE KENNWERTE DER HISTORISCHEN MÖRTEL	28
3.4	GEFÜGEUNTERSUCHUNGEN	29
3.4.1	<i>Porosität und Porenradienverteilung der historischen Mörtel</i>	29
3.4.2	<i>Rasterelektronenmikroskopie</i>	31
3.5	FAZIT DER UNTERSUCHUNGEN	34
4	ENTWICKLUNG EINER PRÜFMETHODIK ZUR BEURTEILUNG DER WASSERRESISTENZ	35
4.1	LAGERUNG UND HERSTELLUNG DER BINDEMITELPASTEN.....	35
4.2	ÄNDERUNGEN DER EIGENSCHAFTEN DURCH KONSTANT- UND WECHSELLAGERUNGEN	37
4.2.1	<i>Massenänderungen</i>	37
4.2.2	<i>Längenänderungen</i>	39
4.2.3	<i>Änderungen des dyn. E-Moduls</i>	42
4.2.4	<i>Änderungen der Phasenzusammensetzung</i>	44
4.2.5	<i>Porenradienverteilung/Porosität</i>	46
4.2.6	<i>Rasterelektronenmikroskopie</i>	48
4.3	PRAXISVERSUCHE.....	49
4.3.1	<i>Anlegen der Musterflächen</i>	50
4.3.2	<i>Beurteilung nach einjähriger Standzeit</i>	51
4.4	FAZIT.....	52
5	ENTWICKLUNG VON GIPSMÖRTELN FÜR DEN AUßENBEREICH	54
5.1	CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE	55
5.1.1	<i>Bindemittel auf Calciumsulfatbasis</i>	55
5.1.2	<i>Kalke</i>	56
5.1.3	<i>Zemente</i>	56
5.1.4	<i>Weitere Zusatzstoffe</i>	57
5.1.5	<i>Zuschlag</i>	57
5.1.6	<i>Zusatzmittel</i>	57
5.2	BINDEMITELPASTEN DER REINEN CALCIUMSULFATE.....	57
5.2.1	<i>Frisch- und Festmörtelkennwerte</i>	58
5.2.2	<i>Gefügebraubildung</i>	59
5.2.3	<i>Fazit</i>	60
5.3	EINFLUß VON ZUSATZMITTELN.....	60
5.3.1	<i>Einfluß organischer Säuren/Salze</i>	61
5.3.2	<i>Einsatz von Eiweißstoffen</i>	63
5.3.3	<i>Fazit</i>	65
5.4	EINFLUß ANDERER BINDEMITELE/ZUSATZSTOFFE	66
5.4.1	<i>Einsatz unterschiedlicher Kalke</i>	66
5.4.2	<i>Einsatz unterschiedlicher Zemente</i>	71

5.4.3	<i>Einsatz weiterer Zusatzstoffe</i>	75
5.4.4	<i>Einsatz inerter Füllstoffe</i>	77
5.4.5	<i>Fazit</i>	79
5.5	EINSATZ VON ZUSCHLAG.....	81
5.5.1	<i>Frischmörtelkennwerte</i>	82
5.5.2	<i>Massenänderungen</i>	83
5.5.3	<i>Mechanische Kennwerte</i>	85
5.5.4	<i>Hygrische Kennwerte</i>	89
5.5.5	<i>Andere Bindemittel/Zuschlag-Kombinationen</i>	91
5.5.6	<i>Fazit</i>	93
5.6	GEEIGNETE MISCHUNGEN FÜR DEN EINSATZ IM AUßENBEREICH	94
6	OBJETBEZOGENE OPTIMIERUNG – ANLAGE VON MUSTERFLÄCHEN	95
6.1	OBJEKTBEZOGENE OPTIMIERUNG.....	95
6.2	ANLAGE VON MUSTERFLÄCHEN.....	97
6.2.1	<i>Johannes Servatius-Kirche in Pöhlde</i>	99
6.2.2	<i>St. Cyriaci in Dorste</i>	101
6.2.3	<i>Beurteilung der Musterflächen nach 18-monatiger Standzeit</i>	103
7	ZUSAMMENFASSUNG	104
8	LITERATURVERZEICHNIS	111
9	ANHANG	117

1 Einleitung

Das Bindemittel Gips fand neben Kalk eine breite Verwendung als Baustoff, bereits lange bevor der Zement die Anwendung dieser Bindemittel in vielen Bereichen verdrängte.

Vor allem in Gebieten mit natürlichen Vorkommen wurden Gips und Kalk als Baustoff eingesetzt. Für den Gips bzw. Anhydrit ist hier beispielhaft das Thüringer Becken zu nennen [STARK 95]. Die Art der Verwendung reichte dabei vom Mauerstein, über Gipsestrich und „Gipsbeton“ bis hin zum Mauer- oder Putzmörtel [STÜRMER]. Trotz der vergleichsweise hohen Löslichkeit von Gips in Wasser (Calciumsulfat-Dihydrat 2,05 g/l, GIPS-DATENBUCH, zum Vgl.: Calciumcarbonat 0,014 g/l) wurden solche Gipsmörtel auch im Außenbereich der Bauwerke verarbeitet. Beispiele für solche Bauwerke finden sich z.B. im Harz, in Niedersachsen, Thüringen und in Mecklenburg-Vorpommern [KULKE, STEINBRECHER].

Moderne Gipsbaustoffe werden vorwiegend im Innenausbau, z.B. als Gipskartonplatten, Estrich oder als Gipsputz eingesetzt. Für eine dauerhafte Bewitterung sind sie in der Regel nicht geeignet. Zudem ist ein Einsatz solcher Baustoffe im Außenbereich nach geltenden Normen nicht zulässig (vgl. DIN 18550).

Die Tatsache, daß noch viele der historischen „Gipsbauwerke“ in gutem Zustand erhalten sind, zeigt, daß es grundsätzlich möglich sein muß, Gipsmörtel herzustellen, die sich im Außenbereich als dauerhaft erweisen.

Ziel dieser Arbeit war es daher, zur Restaurierung dieser historischen Gebäude Gipsmörtel zu entwickeln, die im Außenbereich einsetzbar sind. Um einen Einsatz als Reparaturmörtel für geschädigte Objekte zu ermöglichen, ist es erforderlich die Mörtel dem historischen Altmaterial bezüglich ihrer Kennwerte anzupassen. Neben langfristigen Praxisversuchen (Applikation an Testflächen/Testobjekten) sollte die Wasserresistenz der Mörtel mit einer Prüfmethode untersucht werden, die in der Praxis auftretende Schäden im Labor nachstellt.

Im folgenden soll kurz auf stoffliche Grundlagen des Systems Calciumsulfat - Calciumsulfat-Halbhydrat - Calciumsulfat-Dihydrat, die Eigenschaften historischer Gipsmörtel sowie die Untersuchung der Wasserresistenz von Gipsmörteln eingegangen werden.

1.1 Der Baustoff Gips – stoffliche Grundlagen

Gips als Gipsstein ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) und Anhydrit als Anhydritstein (CaSO_4) kommen weitverbreitet als Mineralien in der Erdkruste vor. Sie sind durch Auskristallisation aus übersättigten, wäßrigen Lösungen seichter Meeresteile entstanden. Dabei wurden neben Sulfaten auch Carbonate und Chloride in der Reihe ihrer Löslichkeit abgesetzt. Abhängig vom

geologischen Alter der Gipsvorkommen unterscheidet man zwischen Zechstein- (ca. 240 Mio. Jahre), Muschelkalk- (ca. 215 Mio. Jahre) und Keuper-Gipsen (ca. 205 Mio. Jahre).

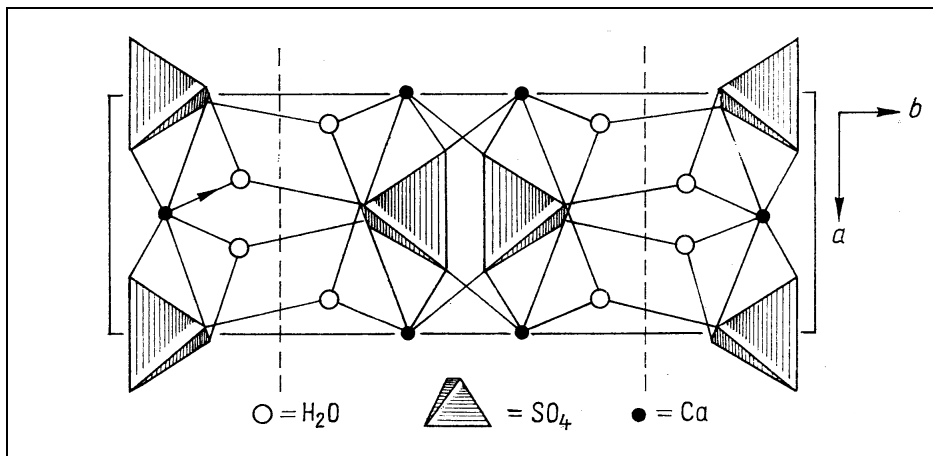
In Deutschland findet man Zechstein-Gipsvorkommen vor allem im südlichen und nördlichen Harzvorland. Keuper-Gipse findet man in Mainfranken und Baden-Württemberg, Muschelkalk-Gipsvorkommen in Nordbayern, Oberfranken, dem Saarland und in Rheinland-Pfalz. Als häufigste Verunreinigungen (bedingt durch die Entstehung) treten Calciumcarbonat (Kalk), Dolomit, Mergel und Ton auf. Seltener finden sich Kieselsäure, Bitumen, Glauberit, Syngenit oder Polyhalit [WIRSCHING].

Zunehmend an Bedeutung gewinnen auch die Gipse/Anhydrite aus technischen Prozessen, wie z.B. Gips aus der Phosphorsäure- oder Flußsäure-Herstellung oder der Rauchgasentschwefelung. 1996 fielen in Deutschland ca. 5 Mio. t Rauchgasgips an, das ist mehr als die Menge, die jährlich an Naturgips für den Bausektor abgebaut wird (ca. 3 Mio. t) [SCHOLZE , Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte – Infoblatt 97].

Die Bedeutung des Gipses als industriell verwertbares Produkt beruht auf seiner Fähigkeit zur Dehydratation und Rehydratation. Ausgangsprodukt dieser Prozesse ist jeweils die Phase des Calciumsulfat-Dihydrates. Durch Dehydratation können in Abhängigkeit von den Herstellungsbedingungen (Temperatur, Druck, etc.) [WIRSCHING, GIPS-DATENBUCH] die Phasen α - und β -Halbhydrat, Anhydrit III, Anhydrit II und Anhydrit I entstehen. Halbhydrat und Anhydrit III stellen metastabile Phasen dar und gehen unterhalb 40 °C, ebenso wie Anhydrit II, in Dihydrat über. Anhydrit II, der natürlich vorkommende Anhydrit ist im Temperaturbereich zwischen 40 °C und 1180 °C stabil. Oberhalb dieser Temperatur tritt Anhydrit I auf.

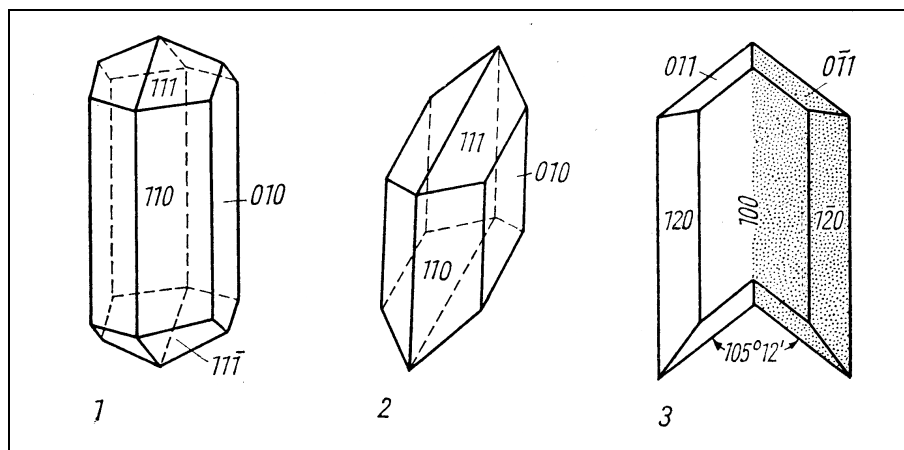
Die Kristallstruktur der Calciumsulfate wird von Ketten mit wechselnder Anordnung von Ca^{2+} - und tetraederförmigen SO_4^{2-} -Ionen gebildet, wie die Abbildung 1 am Beispiel des Calciumsulfat-Dihydrates zeigt [RÖSLER].

Abbildung 1: Monokline Kristallstruktur von Gips, Projektion auf die senkrecht zur c-Achse verlaufende Fläche (gestrichelte Linien zeigen die Spaltbarkeitsrichtungen)



Die Doppelschichten von SO₄²⁻-Tetraedern und Ca²⁺-Ionen, die beidseitig von Lagen aus Wassermolekülen mit nur schwachen Bindungskräften begrenzt werden, sind der Grund für die vollkommene Spaltbarkeit des Gipses parallel zur Fläche 010 (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Habitus von Gipskristallen



1887 begründete LeChatelier die Kristallisationstheorie, die den Mechanismus der Hydratation erklärte. Dabei ging er davon aus, daß zunächst eine gesättigte Lösung der anhydrierten Phase (Halbhydrat, Anhydrit) gebildet wird, welche übersättigt in Bezug auf das Dihydrat ist. Dies führt zur Kristallisation des Calciumsulfat-Dihydrates. Spätere Untersuchungen konnten die Kristallisationstheorie weitestgehend bestätigen [KRÖNERT 75, LUCAS 74].

Demnach kann der Abbindevorgang durch drei Phasen charakterisiert werden. Die erste Phase, die Induktionsperiode, endet etwa mit dem Versteifungsbeginn. Bei Kontakt mit dem Anmachwasser geben die Phasen Anhydrit bzw. Halbhydrat Calcium- und Sulfat-Ionen an die

Lösung ab, die nach kurzer Zeit in Bezug auf diese Phasen gesättigt ist. Aus dieser bezüglich des Dihydrats übersättigten Lösung können durch spontane Keimbildung oder an der Oberfläche der Ausgangsphasen Dihydratkristalle entstehen. Die Hydratationsgeschwindigkeit hängt in diesem Stadium der Reaktion von der Keimbildungshäufigkeit, der Keimbildungsgeschwindigkeit und der Kristallwachstumsgeschwindigkeit ab. Wird die Gesamtoberfläche der anhydrischen Anteile kleiner, erreicht die Hydratationsgeschwindigkeit ihren Höhepunkt und wird über die Auflösungsgeschwindigkeit der anhydrischen Anteile bestimmt. Gegen Ende der Hydratation kann nur noch in Bereichen, in denen sich anhydrische Kristallreste befinden, eine Auflösung und damit auch ein Dihydrat-Wachstum stattfinden.

In der zweiten Phase des Abbindevorgangs kommt es durch interkristalline Kontakte der Neubildungen zu einer Vernetzung der Kristalle. Die Festigkeit der versteifenden Masse wird dadurch erhöht.

Rekristallisationsvorgänge bestimmen die dritte Phase des Abbindevorgangs. Fehlerhaft ausgebildete oder sehr kleine Dihydrat-Kristalle werden von größeren, gut ausgebildeten Kristallen aufgezehrt. Diese Prozesse laufen relativ langsam ab und sind mit einer Verminderung der Festigkeit verbunden.

Durch Beschleuniger oder Verzögerer können die bei der Hydratation ablaufenden Prozesse und damit der Abbindevorgang beeinflusst werden [vgl. BENZ, FORG, OTTEMANN].

Eine Erhöhung der Auflösungsgeschwindigkeit der anhydrischen Phasen, eine Erhöhung der Löslichkeit dieser Phasen und eine Erhöhung der Keimbildungshäufigkeit (des Dihydrates) führen zu einer Beschleunigung der Hydratation. Beeinflusst werden diese Größen durch die Zugabe geeigneter „Beschleuniger“, in der Regel anorganische Salze. Als geeignete Beschleuniger gelten z.B. Zink- oder Kaliumsulfat.

Eine Verzögerung der Hydratation wird dann erreicht, wenn die Auflösungsgeschwindigkeit der anhydrischen Phasen erniedrigt oder die Löslichkeit des Dihydrats im Vergleich zu diesen Phasen gesenkt wird. Die Adsorption von Verzögerer-Ionen an der Oberfläche der wachsenden Dihydratkeime und deren Einbau in das Kristallgitter führt ebenso wie eine Erhöhung des Diffusionswiderstandes (für Ionen auf dem Weg zum Dihydratkristall \Rightarrow Komplexbildung) zu einer Verzögerung der Reaktion.

Die benötigte Menge an Verzögerer ist dabei davon abhängig, welche Art der Verzögerung vorliegt. Stoffe, bei denen eine Komplexbildung vorherrscht, werden nur in geringen Mengen benötigt (z.B. Citronensäure), während eine Verzögerung durch Adsorption (z.B. Weinsäure, Essigsäure) entsprechend größere Mengen an Verzögerer verlangt. Als verzögernde Zusatzstoffe sind z.B. Alkali- und Erdalkalihydroxide, Alkali- und Ammoniumphosphate

sowie organische Säuren und deren Salze bekannt [LUCAS 74]. Häufig wird beim Einsatz von Verzögerern auch eine Änderung der Kristallmorphologie beobachtet, die auf das verlangsamte Kristallwachstum und eine bessere Ausbildung der Kristalle zurückzuführen ist. Neuere Untersuchungen zeigen, daß die Zugabe berstimmter Verzögerer das Wachstum einzelner Kristallflächen besonders fördert [MIDDENDORF 98].

Während Bindemittel auf Basis von Anhydrit erst durch Feinstmahlung und ggf. den Einsatz von Beschleunigern eine ausreichende Reaktivität zeigen, müssen α - und β -Halbhydrat in der Regel verzögert werden, da ansonsten binnen Minuten eine Verfestigung eintritt. Aber auch eine Kombination von Verzögerer und Anreger ist möglich, um so gewünschte Verarbeitungseigenschaften einzustellen.

Der Baustoff Gips zeigt im Vergleich mit hydraulischen Bindemitteln Vor- und Nachteile. Eine energetisch günstige Herstellung, schnelles Erstarren, gute Haftung am Untergrund, einfache Verarbeitbarkeit, ein relativ niedriges Raumgewicht, eine hohe Formstabilität sowie eine geringe Wärmeleitfähigkeit erweisen sich in den üblichen Einsatzgebieten als vorteilhaft. Die entscheidenden Nachteile der Gipsbaustoffe liegen in ihrer hohen Wasserlöslichkeit und generell in ihrer Empfindlichkeit gegenüber Durchfeuchtung. Die zu beobachtenden Längenänderungen und der Festigkeitsabfall, die bei länger andauernder Feucht- bzw. Wasserlagerung zu beobachten sind [Putzgips ca. 5 mm/m bei Wassertränkung - ENGELKE, Festigkeitsverlust 40 % bei 1 % Feuchte - RUSSELL], beschränken die Einsatzmöglichkeiten des Gipses im Normalfall auf den Innenbereich.

1.2 Historische Gipsmörtel

Das Mineral Gips und die entsprechenden Brennprozesse sind bereits sehr lange bekannt. Der älteste gesicherte Nachweis der Anwendung von Gips in Form von Gipsputz als Untergrund für Fresken wurde in der Stadt Catal Huyuk in Kleinasien gefunden und wird auf die Zeit um 9000 v. Chr. datiert. Auch in Ägypten war der Estrichgips bekannt und es wurde mit Gipsmörtel gemauert. Die Verwendung von Gips zur Herstellung von Abgüssen wurde ebenfalls bereits in der Antike durch Plinius d.Ä. beschrieben [STARK 95]. Als Material zum Ausfachen von Fachwerkkinnenwänden fand Gips in Mitteleuropa ab dem 11. Jahrhundert Verwendung. Die feuerhemmende Wirkung von Gips wurde ab dem 16. Jahrhundert erkannt und gezielt genutzt.

Auch in Deutschland finden sich bedeutende Gipsvorkommen. Seit dem frühen Mittelalter wurden u.a. im Harz und im Thüringer Becken Estrichgips, Gipsmörtel bzw. Gips zur plastischen Dekorierung von Wänden und Denkmälern verarbeitet. Mit der Entwicklung des

Zementes verlor der Baustoff Gips für Außenanwendungen an Bedeutung. Kenntnisse und Traditionen zur Herstellung und Verarbeitung dieses Baustoffes gingen verloren. Daß Gipsmörtel auch im Außenbereich dauerhaft sein können, zeigen viele Beispiele von noch bestehenden historischen Bauten, wie eine statistische Erhebung, die im Auftrag der ev.-luther. Landeskirche Hannovers durchgeführt wurde (Quelle: Fa. Böttcher, Hamburg), belegt. Es wurden mehr als 300 Bauwerke gezählt (Raum Norddeutschland), bei denen Gipsmörtel an den Außenflächen verarbeitet wurden. Bei ca. einem Drittel dieser Bauwerke ist der maximale Gipsanteil im Mörtel größer als 80 %.

Heutige Produktionsverfahren von Gipsbindemitteln sind gezielt auf die Herstellung einzelner Phasen (z.B. α - und β -Halbhydrat) oder Phasengemische definierter Zusammensetzung eingestellt [WIRSCHING, GIPS-DATENBUCH]. Bei den historischen Gipsen handelte es sich meist um Hochbrandgipse, die in Abhängigkeit von den im Brennofen herrschenden Bedingungen ein Gemisch unterschiedlicher Phasen ergaben [LUCAS 92]. Noch bis Mitte des letzten Jahrhunderts wurde Gips neben der industriellen Herstellung in Gipskochern oder Pfannen auch in sog. Feldbrandöfen hergestellt. Der Gips-Rohstein wurde dazu so aufgeschichtet, daß er von unten befeuert werden konnte. Ein Brand dauerte zwischen 20 und 80 Stunden und verlief bei durchschnittlichen Temperaturen von ca. 950 °C. Hauptbestandteil derart hergestellter Branntgipse war Anhydrit II, die eigentliche Hochbrandphase. Aufgrund schwankender Temperaturen (ca. 700 – 1000° C) und einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung in solchen Öfen muß aber davon ausgegangen werden, das auch andere Phasen entstanden, z.B. Dihydrat als Rohgipsrest, β -Halbhydrat und Anhydrit III als Niederbrandphasen, Calciumsulfid als Reaktionsprodukt mit beim Verbrennungsprozeß entstandenen Kohlenmonoxid, sowie Branntkalk aus Verunreinigungen durch Kalkstein und thermische Zersetzung des Calciumsulfats. Derart fertiggestellter Branntgips wurde anschließend zerkleinert, homogenisiert und als Allzweckmörtel eingesetzt [LUCAS 92].

Dünnschliffe historischer Gipsmörtel zeigen ein Gefüge, daß neben einer feinen Gipsmatrix einen beträchtlichen Anteil an Grobkorn aufweist (bis zu 20 %, ermittelt durch Auszählen von Anschliffen im Rahmen eigener Untersuchungen).

Frühere Untersuchungen [MIDDENDORF 91] zeigten, daß es sich bei im Außenbereich verwendeten Gipsmörteln häufig um Gips-Kalk-Gemische handelte. Es wurden Mörtel gefunden, die in ihrer Zusammensetzung vom reinen Gipsmörtel, über Gips-Kalk- bzw. Kalk-Gipsmörtel bis hin zum fast reinen Kalkmörtel mit nur noch Spuren von Gips (ggf. Verunreinigungen) reichten.

Bei reinen Gipsmörteln ist die Beständigkeit über Jahrhunderte hinweg wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß Gipsmatrix und Grobkorn eine Einheit bilden und ohne Abgrenzung ineinander übergehen [LUCAS 92]. Sind auch Anteile an Kalk im Gipsmörtel enthalten, so findet eine zusätzliche Stabilisierung durch eine Anreicherung desselben in den stark beanspruchten Zonen des Gipsmörtels statt [MIDDENDORF 91]. Dies konnte auch anhand eigener Untersuchungen bestätigt werden (siehe Kapitel 4.2.6).

1.3 Wasserresistenz von Gipsbaustoffen

1.3.1 Schäden an Gipsbaustoffen im Außenbereich

Wird Gips als Außenbaustoff verwendet, kann es langfristig zu Veränderungen des Gefüges und der Festigkeit kommen. Die Mechanismen, die bei der Schädigung eine Rolle spielen, sind vielfältig und häufig abhängig von der baulichen Situation. Neben einer oberflächlichen Anlösung durch Regenwasser können Mehl- und Knöllchenbildung sowie die Zermürbung des Materials beobachtet werden [LUCAS 95].

Abhängig von der Art des angreifenden Wasser (Tropfwasser, Regenwasser, fließendes und stagnierendes Wasser) können unterschiedlichste Lösungsfiguren, z.B. „Zahnschmelzstrukturen“, Rillen bzw. Rinnen im Mörtel entstehen. Zur Mehlbildung (Ausblühungen aus Gips) kommt es bei der Verdunstung der mit Calciumsulfat gesättigten Porenlösung der Gipsbaustoffe. Hohe Luftfeuchtigkeiten (z.B. in Kellern, 70 – 90 %) können sowohl auf den Oberflächen der Gipsmörtel als auch der verwendeten Mauersteine, z.B. Ziegel, zur Bildung von Knollen führen.

Eine ständige Durchfeuchtung und Trocknung der Gipsmörtel kann schließlich eine Zermürbung bzw. ein „Faulen“ [vgl. auch KARSTEN] verursachen. Umkristallisation und – partiell - verspätete Hydratation noch vorhandenen Anhydrits sind verantwortlich für solche Prozesse, bei der es zur Auflösung, und durch den Kristallisationsdruck auch zu einem Quellen der Gipsbaustoffe kommen kann.

1.3.2 Untersuchung der Wasserresistenz

Bei der Schädigung von Gipsbaustoffen spielen im wesentlichen zwei Mechanismen eine Rolle - zum einen eine vollständige Auflösung und der Abtransport des gelösten Materials, z. B. durch Schlagregen, Ablaufwasser etc.. Zum anderen wirken auch Prozesse der Umkristallisation schädigend auf die Gipsbaustoffe. Dabei geht zunächst Material in Lösung, gelangt über Kapillartransport in andere Bereiche des Mauerwerks und kann, wenn die

Möglichkeit zur Verdunstung gegeben ist, dort wieder auskristallisieren. In der Literatur wird eine Vielzahl von Methoden beschrieben [ENGELKE, RUSSELL, GÖTZE, MIDDENDORF 96], die zur Untersuchung der Änderung der Eigenschaften von Gipsbaustoffen bei Durchfeuchtung herangezogen wurden. Als Konstantlagerungen findet man dabei z.B. Anmachwasserblockierung [ENGELKE] oder eine ständige Lagerung unter Wasser [ENGELKE, MIDDENDORF 96]. Bei den beschriebenen Wechsellagerungen variieren sowohl der Grad der Durchfeuchtung, als auch die Dauer der einzelnen Zyklen [RUSSELL, GÖTZE]. Ein einheitliches Vorgehen oder eine Normung zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Gipsbaustoffen gibt es jedoch nicht. Der lösende Angriff, der z.B. durch Schlagregen - also fließendes Wasser - verursacht wird, wurde in den wenigsten Fällen [LUCAS 95, MIDDENDORF] berücksichtigt, da die Verwendung von Gipsbaustoffen immer noch vorwiegend im Innenraum gesehen wird.

1.3.3 Erhöhung der Wasserresistenz

Unabhängig von einem Einsatz als Saniermaterial wurde aufgrund der vielen positiven Eigenschaften schon frühzeitig nach Möglichkeiten gesucht, einen wasserresistenteren Gips für den Einsatz im Außenbereich bzw. in Feuchträumen herzustellen [GRAF]. Eine umfassende Zusammenstellung der Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserresistenz von Gips geben SINGH und KNÖFEL. Eine Vielzahl von Patenten zeugt ebenfalls von dem großen Bedarf, einen dauerhaft hydrophoben Gipsbaustoff zu entwickeln. Diese Versuche lassen mehrere Verfahrensweisen erkennen:

Zum einen wurde versucht, den Feuchtwiderstand der Gipsbaustoffe durch Zugabe von hydraulischen, latent hydraulischen oder puzzolanischen Zusatzstoffen zu erhöhen. GLADKI und KLOPPE führten 1968 Versuche mit Portlandzement und Flugasche bzw. Calciumhydroxid und Braunkohlenfilterasche durch. Andere Autoren berichten über die Verwendung von Microsilica, Hochofenschlacke, HS-Zementen, Traßmehl, auch in Kombination mit anderen Zusatzmitteln, zur Modifizierung von Gipsbaustoffen [vgl. SINGH II, ODLER etc.]. Auf diese Weise gebildete C-S-H-Phasen sowie Ettringit sollen gefügeverstärkend wirken und durch die Verringerung der Kapillarporosität zu einer Verbesserung des Feuchtwiderstandes führen. Doch auch bei der Verwendung von HS-Zementen treten immer wieder Schäden aufgrund starker Treiberscheinungen durch sekundäre Ettringitbildung auf [WERNER].

Schon 1951 berichten GRAF und RAUSCH, sowie später HOFMANN und SARACZ über Versuche einer nachträglichen Härtung der Gips-Oberfläche durch Tränkung mit Lösungen verschiedenster Salze (Alaun, Borax, Bariumchlorid, Salze der Phosphorsäure und der Ölsäure etc.). Durch die Reaktion mit ebenfalls zugegebenen Füllstoffen (z.B. Calciumhydroxid)

sollten unlösliche Fällungsprodukte (z.B. Calciumphosphat) gebildet werden. Die Wasserbeständigkeit konnte jedoch nicht in allen Fällen verbessert werden, zudem kam es bei vielen Salzen zu unerwünschten Ausblühungen.

Die Zugabe von Zusatzmitteln zu Gipsmörtelmischungen war Bestand weiterer zahlreicher Untersuchungen zur Verbesserung der Wasserresistenz. Dabei wurden organische Stoffe wie z.B. Öle, Wachse oder Harze [KRÄMER] zugegeben. Als weitere Mittel zur Hydrophobierung wurden von CHVATAL Epoxidharze, Stearate sowie unterschiedliche Silicon-Verbindungen untersucht. Andere Autoren [AIGNESBERGER, MATYSZEWSKI] setzten Silikonate in Kombination mit Fließmitteln ein. Heute übliche Hydrophobierungsmittel sind Silane, Siloxane, Siliconate und Siliconharze [WOLTER]. Aber auch mit diesen Zusatzmitteln ist eine dauerhafte Hydrophobierung des Gipses nicht möglich. Je nach eingesetztem Hydrophobierungsmittel kommt es zu unerwünschten Verfärbungen und nach einiger Zeit lassen sich bei Wassereinwirkung immer wieder Festigkeitsverluste feststellen.

1.4 Zielsetzung

Die Qualität und Zusammensetzung und damit auch die technologischen Eigenschaften der historischen Gipsmörtel variieren in weiten Bereichen. Ziel dieser Arbeit war es, widerstandsfähige Gipsmörtel für den Außenbereich zu entwickeln.

Die Entwicklung der wasserresistenten Gipsmörtel erfolgte daher im Rahmen der hier geschilderten Untersuchungen zunächst ohne konkreten Objektbezug.

Die technologischen Anforderungen, die an einen Gipsmörtel für den Einsatz im Außenbereich gestellt sind, sowie die Untersuchungsmethoden, nach denen diese Kennwerte geprüft werden, zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Untersuchungsmethoden und technologische Anforderungen an die Gipsmörtel

Kennwert	Prüfmethode	Anforderungen
<i>Wasserresistenz,</i> <i>Dauerhaftigkeit</i>	nicht normiert, siehe Kap. 4	möglichst hoch, Masseverlust < 30 M.-%
Festmörtel		
Quellen/Schwinden	nach KNÖFEL Methode A6M	≤ 0,15 mm/m
Druckfestigkeit β_D	EN 196-1	≤ 20 N/mm ²
dyn. Elastizitätsmodul E_{dyn}	Resonanzverfahren nach KOTTAS	≤ 10 kN/mm ²
Frost-Tauwechsel-Widerstand FTW	nach KNÖFEL Methode A7M	keine Risse oder Ab- splitterungen
Wasseraufnahmekoeffizient ω	DIN 52617	wie historisches Altmaterial (Stein und Mörtel)
Wasserdampfdiffusions- widerstandzahl	DIN 52615	wie Altmaterial oder größer
Frischmörtel		
Wasser/Bindemittel-Wert W/B	DIN 18555-2	entsprechend dem Ausbreit- maß
Verarbeitbarkeitszeit (Versteifungsbeginn)	DIN 1168-2	≥ 1 h
Wasserrückhaltevermögen WRV	DIN 18555-7	abhängig vom Untergrund

Wichtigstes Kriterium für einen Einsatz im Außenbereich ist eine ausreichende Wasserresistenz bzw. Dauerhaftigkeit der Mauermörtel. Da der Baustoff Gips in Deutschland vorwiegend im Innenbereich eingesetzt wird, existieren keine genormten Prüfverfahren für diese Untersuchung. Die Beanspruchungen, denen Gipsmörtel in der Praxis ausgesetzt sind (Regen, aufsteigende Feuchte), wurden im Labor durch unterschiedliche Lagerung der Mörtel simuliert (siehe Kapitel 2.5 und 4).

Einige Kennwerte sind unabhängig vom vorliegenden Altmaterial: Ein geringes Quellen/Schwinden sowie ein ausreichender Frost-Tauwechsel-Widerstand sind für einen dauerhaften Verbund notwendige Eigenschaften. Die Verarbeitbarkeitszeit sollte mindestens eine Stunde betragen [siehe auch KNÖFEL].

Alle anderen Kennwerte sollten dem historischen Altmaterial (Stein und/oder Mörtel) entsprechen. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß es sich bei den entnommenen Proben teilweise um bereits geschädigtes Material handelt (d.h. möglicherweise geminderte Festigkeiten und E-Moduln [ENGELKE]; siehe auch Kapitel 4.2.3). Des weiteren zeigt sich, insbesondere bei einem inhomogenen Mauerwerk (wie z. B. an der Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde, siehe Kapitel 3), eine große Bandbreite der Kennwerte.

2 Untersuchungsmethoden

2.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

2.1.1 Reindichte

Die Reindichte eines Stoffes errechnet sich aus dem Quotienten Masse zu porenfreiem Volumen des Feststoffes. Die Reindichte wurde mit einem Helium-Pyknometer (Hersteller Fa. Micromeritics, Typ AccuPyc 1330) ermittelt.

2.1.2 Spezifische Oberfläche nach Blaine

Die spezifische massebezogene Oberfläche der eingesetzten Bindemittel wurde nach EN 196 Teil 6 mittels Luftdurchlässigkeitsverfahren bestimmt. Sie stellt ein Maß für die Mahlfeinheit des Ausgangsstoffes dar.

2.1.3 Korngrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung der untersuchten Stoffe im Feinbereich zwischen 0,5 und 175 μm wurde mit einem Lasergranulometer (Hersteller Fa. Symapatec, Typ Helos) bestimmt. Die Bindemittel wurden in Isopropanol suspensiert. Die Methode zur Analyse von Partikelgrößenverteilungen basiert auf dem Verfahren der Laserbeugung [HEUER]. Die gemessenen Fraunhofer'schen Beugungsintensitäten sind dabei charakteristisch für bestimmte Partikelgrößenverteilungen.

2.1.4 Qualitative Phasenanalyse

Eine qualitative Phasenanalyse der eingesetzten Bindemittel erfolgte mittels Röntgenbeugung. Die Nachweisgrenze dieser Methode liegt in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung und der Struktur der untersuchten Stoffe bei ca. zwei bis drei Massenprozent. Amorphe und feinkristalline Verbindungen können mit dieser Methode nicht detektiert werden.

Zum Einsatz kam ein Röntgendiffraktometer der Fa. Siemens, Typ D500. Gemessen wurde im Winkelbereich zwischen 3.00° und 65.00° 2-Theta mit einer Winkelgeschwindigkeit von 1.20° 2 θ /min. Die Proben wurden auf Korngrößen kleiner 63 μm gemörsert.

2.2 Frischmörteluntersuchungen

2.2.1 Herstellung der Frischmörtel

Die Herstellung der Frischmörtel erfolgte in Anlehnung an DIN 1168-2: Einstreuen des Trockenmörtels über 45 s, 15 s Einsumpfzeit, 60 s Mischen des Frischmörtels mit der Hand, anschließend weitere 120 s Rühren des Frischmörtels mit dem Norm-Mischer auf Stufe I.

2.2.2 Konsistenz und Wasser/Bindemittel-Wert

Die Konsistenz ist ein Maß für die Verformbarkeit eines Frischmörtels unter Beanspruchung und erlaubt eine Beurteilung der Verarbeitbarkeit.

Die Bestimmung der Konsistenz erfolgte über die Prüfung des Ausbreitmaßes nach DIN 18555-2. Die benötigte Wassermenge bei geeignetem Ausbreitmaß wurde über den Wasser/Bindemittel-Wert in Anlehnung an DIN 1168-2 (für Gips mit werkseitig zugegebenen Zusätzen) ermittelt.

2.2.3 Versteifungsbeginn/Verarbeitbarkeitszeit

Als Maß für die Verarbeitbarkeitszeit der hergestellten Frischmörtel wurde der Versteifungsbeginn an den entsprechenden Proben ermittelt.

Die Bestimmung des Versteifungsbeginns erfolgte in Anlehnung an DIN 1168-2 an den nach Kapitel 2.2.1 hergestellten Frischmörteln.

2.2.4 Wasserrückhaltevermögen

Die Kenntnis des Wasserrückhaltevermögens des Mörtels erlaubt zusammen mit der Saugfähigkeit des Untergrundes eine Beurteilung, wie stark Anmachwasser durch den Untergrund (z.B. Naturstein) abgesaugt wird.

Die Prüfung des Wasserrückhaltevermögens erfolgte mit dem Filterplattenverfahren nach DIN 18555-7.

2.2.5 Rohdichte und Luftgehalt

Rohdichte und Luftgehalt im Frischmörtel sind ein Maß für die Gleichmäßigkeit von Zusammensetzung und Mischen. Die Kennwerte wurden nach DIN 18555-2 bestimmt. In

Abhängigkeit von der Konsistenz der Frischmörtel erfolgte die Verdichtung nach dem Schockverfahren bzw. nach dem Einfüllverfahren, wie in DIN 18555-2 beschrieben.

2.3 Festmörteluntersuchungen

2.3.1 Dynamischer Elastizitätsmodul

Der dynamische Elastizitätsmodul wurde mit dem Resonanzverfahren nach KOTTAS (Ultraschallmeßgerät, Typ: DIGI EG-2 , Hersteller: Fa. Labeck) an Normprismen der Abmessung 4 x 4 x 16 cm³ und Kleinprismen der Abmessung 1,5 x 1,5 x 6 cm³ bestimmt.

Der dynamische Elastizitätsmodul stellt ein Maß für die Verformbarkeit eines Werkstoffes dar.

2.3.2 Biegezugfestigkeit

Das Verhalten eines Werkstoffes unter Zugbeanspruchung kann u.a. durch den Biegezugversuch ermittelt werden.

Die Biegezugfestigkeit wurde nach EN 196-1 im 3-Punkt-Biegeversuch mit einer Presse der Fa. Toni-Technik, Typ Toni Comp. III an Norm- und ggf. Kleinprismen bestimmt.

2.3.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit eines Werkstoffes ist ein Maß für den Widerstand gegenüber Druckbeanspruchungen denen der Probekörper ausgesetzt wird.

Die Druckfestigkeit wurde im einachsialen Druckversuch nach EN 196-1 mit einem Gerät der Fa. Toni-Technik an Norm- und ggf. Kleinprismen untersucht.

2.3.4 Quellen/Schwinden

Das Quellen/Schwinden der Festmörtel wurde in Anlehnung an Methode A6M, KNÖFEL/SCHUBERT mit dem BAM-Setzdehnungsmesser bestimmt. Dazu wurden die Meßplättchen direkt nach Entschalen der Prüfkörper (Norm- und ggf. Kleinprismen) aufgeklebt und die Längenänderungen während der in Kapitel 2.5 beschriebenen Lagerungen ermittelt.

Das so gemessene Quellen/Schwinden beinhaltet neben den Längenänderungen, die durch Änderungen im Feuchtehaushalt auftreten, auch Längenänderungen beruhend auf einem Frühschwinden oder chemischen Reaktionen (Schrumpfen, Carbonatisierung).

2.3.5 Wasseraufnahme

Der Wasseraufnahmekoeffizient ω wird für die feuchtetechnische Beurteilung eines Mörtels, besonders im Vergleich zum jeweiligen Mauerwerksstein, benötigt.

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte nach DIN 52617 an Proben aus entsprechender Vorlagerung.

2.3.6 Widerstand gegen Frosttauwechsel

Die Prüfung des Frosttauwechselwiderstandes erfolgte nach KNÖFEL/SCHUBERT, Methode A7M. Eine Beurteilung der entsprechend behandelten Proben erfolgte abweichend von dieser Vorschrift erst nach 50 Frosttauwechseln durch optische Begutachtung bzw. Wägung der Absplitterungen.

2.3.7 Rasterelektronenmikroskopie

Aussagen hinsichtlich der Mikrostruktur und der Ausbildung der auftretenden Phasen können mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie gemacht werden. Diese Methode erlaubt in Abhängigkeit von der untersuchten Probe eine bis zu 20000-fache Vergrößerung.

Eine qualitative, ggf. quantitative Identifizierung der auftretenden Phasen aufgrund des Gehalts an chemischen Elementen wird durch die angeschlossene energiedispersive Röntgenanalytik ermöglicht.

Zur Anwendung kam ein Rasterelektronenmikroskop (REM), Typ XL 30, Hersteller Fa. Phillips, mit energiedispersiver Röntgenanalytik (EDX), vom Typ PV 9800, Hersteller Fa. EDAX.

Probenmaterial geeigneter Größe wurde mit Leit-C auf einen Aluminium-Probenteller geklebt und mit Gold besputtert. Bei Untersuchungen mittels energiedispersiver Röntgenanalytik wurden die Proben mit Kohlenstoff bedampft.

2.3.8 Porosität und Porenradienverteilung

Die Gesamtporosität und die Porengrößenverteilung wurde mittels Quecksilberdruckporosimetrie mit einem Gerät der Fa. micromeritics, Typ autopore II 9220 bestimmt.

Die entsprechend vorgelagerten Proben wurden auf eine Korngröße von 2 bis 4 mm zerkleinert und bei 40 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Bei der Methode der Quecksilberdruckporosimetrie wird die Tatsache genutzt, daß sich bei nicht benetzenden Flüssigkeiten (z.B. Hg) zunehmend kleinere Hohlräume nur mit größerem Druck füllen lassen. Wird also beispielsweise Quecksilber (bestimmbarer Randwinkel, keine Reaktion mit Bindemitteln) mit immer höherem Druck eingepreßt und das entsprechende eindringende Volumen bestimmt, so lassen sich mit Hilfe folgender Gleichung der Radius der gefüllten Poren, das Porenvolumen sowie die Radienverteilung errechnen.

$$p \cdot r = 2 \sigma \cdot \cos \delta$$

p = Druck (MPa)

r = Porenradius (μm)

σ = Oberflächenspannung (N/m) = 0,485 N/m (bei Verwendung von Hg)

δ = Randwinkel (Grad) = 141,3 ° (bei Verwendung von Hg)

Die Porosität bzw. die Porengrößenverteilung hat Einfluß auf das Verhalten der Baustoffe gegenüber Wasser, Gasen und Witterungseinflüssen.

2.4 Untersuchung historischen Probenmaterials

Um eine optimale Anpassung der entwickelten Mörtel an das historische Altmaterial zu gewährleisten, wurden einige chemisch-mineralogische bzw. technologische und hygrische Kenndaten dieser historischen Mörtel bestimmt. Im folgenden sind die verwendeten Methoden zur qualitativen und quantitativen Analyse der Proben beschrieben.

2.4.1 Qualitative Analysemethoden

2.4.1.1 Röntgenbeugung

Das historische Probenmaterial wurde wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben vorbereitet und hinsichtlich der Phasenzusammensetzung mit dem Röntgendiffraktometer untersucht.

2.4.1.2 Durchlichtmikroskopie

Ergänzend zur Röntgenbeugung wurden von ausgewählten Proben Dünnschliffe der Dicke 20 µm angefertigt und mit einem Polarisationsmikroskop (Hersteller: Fa. Leitz, Typ Ortholux) untersucht.

Mit Hilfe der Durchlichtmikroskopie können auch Mörtelbestandteile detektiert werden, die unter der Nachweisgrenze der Röntgenbeugung (ca. 3 %) liegen oder sich als röntgenamorph erweisen. Zudem kann bei bestimmten Phasen (z.B. Calciumcarbonat, Anhydrit, Gips) nur mit Hilfe der Mikroskopie eine Aussage darüber gemacht werden, ob es sich bei diesen Bestandteilen um Bindemittel oder Zuschlag (bzw. Grobkornanteil des Bindemittels, z.B. bei historischen Gipsmörteln) handelt.

2.4.1.3 Nachweis eiweißhaltiger Zusatzmittel

Vielen historischen Mörteln wurden eiweißhaltige Zusatzmittel wie z.B. Kasein, Molke, Blutserum oder Knochenmehl (Kollagen) zugesetzt [BOENKENDORF]. Noch im Mörtel vorhandene, eiweißhaltige Stoffe wurden nach KNÖFEL mit dem im folgenden beschriebenen Verfahren nachgewiesen.

100 – 200 mg des zerkleinerten Mörtels (Mörsern auf Korngrößen kleiner 63 µm) wurden mit ca. 10 Tropfen einer 1%igen ethanolschen Ninhydrin-Lösung kurz aufgeköcht.

Sind Eiweiße im Mörtel vorhanden, erfolgt eine Blaufärbung der Lösung.

Ein positiver Nachweis kann bedeuten, daß Eiweiße als Mörtelzusatz verwendet wurden. Eine Blaufärbung tritt jedoch ebenfalls auf als Reaktion auf Eiweiße von Mikroorganismen.

2.4.2 Quantitative Analysemethoden

2.4.2.1 Trennungsgang für Gipsmörtel nach KNÖFEL/SCHUBERT

Eine quantitative Analyse der Phasenbestandteile eines Gipsmörtels erfolgte nach folgendem Trennungsgang:

5 g der bei 40°C vorgetrockneten und gemörserten Probe wurden in 80 ml verdünnter Salzsäure (1:3 verdünnt) ca. 2 min unter Kochen gelöst. Dann wurden 200 ml destilliertes Wasser hinzugegeben, um eine Fällung von Sulfaten beim Abkühlen zu verhindern. Die abgekühlte Lösung wurde filtriert, der Filtrerrückstand getrocknet und gewogen. Der säureunlösliche Filtrerrückstand ergab den Zuschlaganteil des Gipsmörtels.

Das übriggebliebene Filtrat wurde auf ein Volumen von 500 ml mit bidestilliertem Wasser aufgefüllt. Aus dieser Lösung wurden mit den Methoden der Ionenchromatographie bzw. der Atomabsorptionsspektroskopie die Anteile an Sulfat-Ionen bzw. Calcium und Magnesium bestimmt. Zum Einsatz kam ein Ionenchromatograph der Fa. Dionex, Typ DX 100, sowie ein Atomabsorptionsspektrometer der Fa. Perkin Elmer.

2.4.2.2 Bestimmung des Anteils an gebundenem Wasser (bei Gipsmörteln)

Aus den nach Kapitel 2.4.2.1 ermittelten Sulfatgehalten und dem Gehalt an Hydratwasser läßt sich der Anteil an Gips (Calciumsulfat-Dihydrat) errechnen. Der eventuell verbleibende Überschuß an Sulfat wird als Anhydrit ausgedrückt.

Der Hydratwassergehalt wurde ermittelt, indem ca. 10 g der Probe bei 360° C getempert wurden. Zuvor wurden die Proben bis zur Massenkonstanz bei 40° C gelagert.

2.4.2.3 Bestimmung des Carbonat-Gehaltes

Der Carbonatgehalt der historischen Mörtel wurde volumetrisch an den gemörserten Proben mit dem Kohlensäurebestimmungsapparat nach Scheibler-Finkener [MENNERICH] ermittelt.

2.5 Wasserresistenz

Die Beanspruchungen, denen Gipsmörtel in der Praxis durch die Umweltbedingungen ausgesetzt sind, wurden im Labor durch unterschiedliche Lagerungen nachgestellt. Um innerhalb begrenzter Zeiträume aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen, wurden dabei bewußt auch sogenannte „worst-case“-Methoden, also Lagerungen mit extremen Beanspruchungen, eingesetzt.

Nicht alle Mischungen wurden mit der gesamten Prüfmethodik untersucht; diese kam nur bei ausgewählten Mischungen zum Einsatz (siehe Kapitel 4).

Im folgenden sind die unterschiedlichen Lagerungen beschrieben, sowie die Untersuchungen, die während bzw. nach Beendigung der Lagerungen an den Proben durchgeführt wurden, um mögliche Schäden zu dokumentieren.

2.5.1 Lagerung/Methoden im Rahmen der Prüfung der Wasserresistenz

Vor Prüfung der Wasserresistenz wurden die Prismen (Norm- bzw. Kleinprismen, vgl 2.3.1) zunächst 28 Tage lang vorgelagert. Die Art der Vorlagerung richtete sich dabei nach den in den Mischungen enthaltenen Komponenten:

2.5.1.1 Vorlagerung

bei Mischungen mit Kalken

1 d in der Form im Feuchteschrank bei 20° C / 95 % rel. LF

27 d im bei 20° C / 65 % rel. LF. und Bewitterung mit 1 Vol.-% CO₂

bei Mischungen mit hydraulisch erhärtenden Komponenten

1 d in der Form im Feuchteschrank bei 20° C / 95 % rel. LF

13 d ausgeschalt im Feuchteschrank bei 20° C / 95 % rel. LF

14 d bei 20° C / 65 % rel. LF und Bewitterung mit 1 Vol.-% CO₂

Nach der entsprechenden Vorlagerung wurden die Proben unterschiedlichen Wasserlagerungen ausgesetzt.

2.5.1.2 Hauptlagerungen zur Prüfung der Wasserresistenz

I. „Auslaugung“ in destilliertem Wasser

Die entsprechend vorgelagerten Prismen wurden mit einer Zange auf eine Korngröße von 1 - 2 mm zerkleinert. Danach wurden 2 g der Proben 1 h bei 20° C in 500 ml destilliertem Wasser gerührt. Im Anschluß erfolgte die Bestimmung des Sulfationen-Gehaltes des wässrigen Auszugs mittels Ionenchromatographie. Daraus wurde der Gehalt an gelöstem Calciumsulfat berechnet und auf die Masse der getrockneten Ausgangsproben bezogen.

II. Lagerung in der Wasserrinne in fließendem Wasser

Kleinprismen der Abmessung 6 cm x 1,5 cm x 1,5 cm wurden in fließendem Wasser 28 Tage bei einer Wassertemperatur von 20° C gelagert. Die Durchflußgeschwindigkeit betrug ca. 0,25 l/min. Ein gleichmäßiger Wasserangriff war gewährleistet [vgl. MIDDENDORF].

III. Ständige Wasseraufnahme (kapillar saugend)

Die ständige Wasseraufnahme, wie sie in der Praxis z.B. durch aufsteigende Feuchte gegeben ist, wurde an Normprismen untersucht. Die Prismen standen hochkant ca. 1 cm tief im Wasser, so daß die ständige Wasseraufnahme und Verdunstung über die Oberfläche gegeben war. Die Wassertemperatur betrug 20 °C. Bei einer Mindestlagerungsdauer von 28 d wurde das Wasser im Rhythmus von 7 Tagen gewechselt, damit keine Sättigung der Lösung eintreten konnte.

IV. Berechnung / Trocknung

Der in der Praxis gegebene Wechsel von Regen und trockenen Wetterbedingungen sollte mit dieser Lagerung nachgestellt werden. Dazu wurden Normprismen bei einer Wassertemperatur von 20° C 1 h mit einer „Gartenbrause“ der Fa. Gardena (Abstand Prisma-Brausekopf ca. 60 cm) beregnet. Die Durchlaufmenge betrug ca. 6 l/min·m². Diese Menge entspricht der eines starken Schlagregens.

Nach dieser Berechnung folgte eine Lagerung von 3 bzw. 4 d bei 40° C im Trockenschrank. Es wurden zwei Zyklen pro Woche bei einer Mindestlagerungsdauer von 28 d durchgeführt.

V. Kapillares Saugen / Trocknung

a) Kapillares Saugen über die **Stirnfläche (hochkant)**

Die Prüfung wurde anhand von Normprismen durchgeführt. Die Wasseraufnahme erfolgte durch kapillares Saugen bei einer Wassertemperatur von ca. 20° C über die Stirnfläche. Die Tauchtiefe betrug dabei ca. 1 cm. Die Dauer der Wasserlagerung wurde dem Verhalten einer Nullprobe, in diesem Fall Naturanhydrit (NA), angepaßt. Bei Erreichen einer Steighöhe von ca. 16 cm wurde die Wasserlagerung abgebrochen. Die so ermittelte Zeitspanne (in diesem Fall: 1 h 45 min) wurde auch für die anderen Mischungen festgelegt. Anschließend folgte eine Lagerung von 3 bzw. 4 Tagen bei 40° C im Trockenschrank.

b) Kapillares Saugen über die **Seitenfläche**

Bei der zweiten Lagerung dieser Art erfolgte die Wasseraufnahme über die Seitenfläche. War eine völlige Durchfeuchtung erreicht, wurden die Proben 3 bzw. 4 d im Trockenschrank bei 40 °C gelagert.

Bei beiden Verfahren wurden mindestens 8 Zyklen durchlaufen.

Zum Vergleich erfolgte eine trockene „Null-Lagerung“ bei einem Klima von 23 °C und 50 % Luftfeuchte, ebenfalls im Anschluß an die Vorlagerung.

2.5.2 Durchgeführte Untersuchungen während der Feucht- bzw. Wechsellagerungen

Während den beschriebenen Lagerungen wurde neben der Massenänderung das Quellen/Schwinden und die E-Modul-Entwicklung der einzelnen Mischungen verfolgt. Darüber hinaus wurden nach Abschluß der Lagerungen exemplarisch weitere Untersuchungen, z.B. Quecksilber-Druckporosimetrie und Mikroskopie (Licht-, REM) durchgeführt.

Die Massenänderungen, die während der Lagerungen zur Untersuchung der Wasserresistenz (Kap. 2.5) auftreten, wurden wöchentlich durch Wägung ermittelt. Die Wägung erfolgte dabei vor erneuter Durchfeuchtung (Methode IV, Va und Vb), bzw. im durchfeuchteten Zustand (Methode III).

Eine Ausnahme bilden die Methoden I und II. Hier konnten nur einmalige Werte nach Beendigung des Prüfverfahrens ermittelt werden. Im Rahmen der Prüfmethode I wurde der Massenverlust anhand der Löslichkeit in Wasser bestimmt. Die Bestimmung der Löslichkeit erfolgte mittels Ionenchromatographie mit einem Ionenchromatograph der Fa. Dionex, Typ DX 100 (siehe I, Kap. 2.4.2).

Die Proben für das Prüfverfahren II wurden nach 28-tägiger bzw. 56-tägiger Wasserlagerung bei 40° C getrocknet; die Massenänderung wurde durch Wägung bestimmt.

3 Untersuchung historischen Materials

Bei der Entwicklung von Mörteln für die Denkmalpflege sind neben den in den Normen genannten Eigenschaften auch weitere von Interesse, vor allem solche, welche die Dauerhaftigkeit im Mauerwerk betreffen (KNÖFEL). Der Zustand des Altmaterials läßt sich durch die entsprechenden Kennwerte beschreiben (siehe Tabelle 1). Für die Anpassung des Ersatzmörtels an das vorhandene Material müssen daher diese Kennwerte bestimmt werden.

Um eine möglichst breite Basis an Informationen über historische Gipsmörtel zu gewinnen, wurde historisches Material unterschiedlichster Bauwerke untersucht.

Für eine Applikation geeigneter Gipsmörtel wurden beispielhaft die Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde (Abbildung 3) und St. Cyriaci-Kirche in Dorste (Abbildung 4) ausgewählt.

Beide Kirchen wurden im Außenbereich mit nahezu reinen Gipsmörteln gemauert, sind nun aber teilweise stark geschädigt und müssen in absehbarer Zeit mit geeigneten Mörtelsystemen restauriert werden. Als Schadensbilder treten hier vor allem Lösungserscheinungen an der Oberfläche, Abmehlen und eine Zermürbung des Gipsmörtels auf.

Chemisch-mineralogische, mechanische und hygrische Kennwerte wurden ermittelt und zur objektbezogenen Weiterentwicklung geeigneter Ausgangsmischungen herangezogen.

Neben der gezielten Entnahme und Untersuchung der Proben an den Kirchen in Pöhlde und Dorste wurden weitere Einzelproben untersucht, die verschiedenen Bauwerken entstammen und auch in der Art ihrer ursprünglichen Anwendung variieren (Mauermörtel, Estrich etc.).

Es handelt sich dabei um Proben folgender Bauwerke, die von Prof. Dr. Kulke, Universität Clausthal zur Verfügung gestellt wurden:

Tabelle 2: Aufstellung der untersuchten historischen Gipsproben

<u>Probenbezeichnung</u>	<u>Charakterisierung</u>
O I	Turm zu Osterode, Gipsmörtel aus Abbruchmaterial, wahrscheinlich Außenwand, grober Zuschlag
O II	Turm zu Osterode, Gipsmörtel aus Abbruchmaterial, wahrscheinlich Außenwand, feiner Zuschlag
OHA128	Alte Burg Osterode, Außenwandschicht Gipsmörtel, frühe Romanik
Hans6	Feldsteinkirche Hanstedt, Landkreis Lüneburg, Füll-Mauerwerk, vermutlich romanisch
GÖL1	Kirche Göllingen, Thüringer Becken, romanischer Estrich
ELL-JOH 30	Johanniskirche Ellrich, Füllmauerwerk, gotisch

WEND10	Burg Wendelstein, Unstuttal, vermutlich späte Gotik bzw. frühe Renaissance
OHA 9 (STM)	Osterode, Stadtmauer, vermutlich 16. Jahrhundert
HZBG200	Schloß Herzberg, Südharz, Estrich aus dem 16. Jahrhundert
DRÜ 9	Kloster Drübeck, sog. Abtissinenhaus, vermutlich 17. Jahrhundert
SOND 6	Schloß Sondershausen, Thüringen, Estrich aus dem 18. Jahrhundert

Diese Proben wurden hinsichtlich mechanischer und teilweise hygriischer Kennwerte untersucht. Die Ergebnisse (Tabelle A 2 im Anhang) dienen der Aufstellung bzw. Verifizierung eines allgemeinen Anforderungsprofils, im folgenden wird daher nicht näher auf die Einzelergebnisse eingegangen.

3.1 Beprobte Bauwerke

3.1.1 Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde

Die heutige Johannes-Servatius-Kirche (Abbildung 3) in Pöhlde wurde auf den Grundmauern eines Prämonstratenser-Klosters aus dem Jahre 1240 im 17. Jahrhundert neu erbaut. Der Fachwerkbau wurde auf den Grundmauern des Mittelschiffs des alten Klosters errichtet, was die auffallend langgestreckte Form der Kirche erklärt. Weitere Reste der gotischen Klosterkirche sind noch in Form eines gotischen Fensters an der Ostseite der Kirche zu finden. Ein weiteres verbürgtes Datum in der Baugeschichte der Johannes-Servatius-Kirche ist der Abriß des baufälligen Westturms im Jahre 1768 und der darauf folgende Neubau eines Turms an der Ostseite des Bauwerks.

Abbildung 3: Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde, Südseite



Eine Beprobung der Kirche fand an der sehr stark geschädigten Südseite im Bereich dieses Turms bzw. am Übergang Turm-Kirchenschiff statt.

Statt der Fachwerkbauweise findet sich dort ein sehr heterogenes Mauerwerk. Als

Mauerwerkssteine wurden unterschiedlichste Materialien eingesetzt: Rotsandstein, Grauwacke, Nüxeier Dolomit u.a.. In den für die Anlage der Musterflächen vorgesehenen Bereichen wurden fünf Proben des verwendeten Fugenmaterials sowie 10 Steinproben entnommen und untersucht (siehe Abbildung A 1 bis Abbildung A 3). Im Vorfeld waren zementäre Mörtel aus früheren Reparaturmaßnahmen, welche die Gipsmörtel teilweise überdeckten, entfernt worden. Eine Beschreibung der Probenlage und -bezeichnung findet sich im Anhang, Tabelle A 3.

3.1.2 St. Cyriaci-Kirche in Dorste

Die St. Cyriaci-Kirche in Dorste (Abbildung 4) weist ein relativ homogenes Mauerwerk auf. Als „Zierstein“ wurde im Bereich der Fenster, Portale etc. auch Sandstein eingesetzt. Der Turm der Kirche, ehemals komplett mit rotem Sandstein gemauert, wurde im Rahmen einer Baumaßnahme mit einer Außenschale verkleidet, um den weiteren Zerfall des stark zurückgewitterten Sandsteines zu stoppen. Zur Baugeschichte der St. Cyriaci-Kirche in Dorste lagen keine Informationen vor.

Abbildung 4: St. Cyriaci in Dorste, Südseite



Im direkten Vergleich mit der Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde scheint das Mauerwerk und speziell der Gipsmörtel der Kirche in Dorste weniger stark geschädigt. Schadensbilder wie Lösungerscheinungen, Abmehlen und Zermürbung finden sich vor allem unterhalb der Fenster.

Eine Beprobung der Kirche fand an der Nord- und Ostseite der Kirche in Bereichen statt, welche die oben genannten Schäden aufwiesen (siehe Abbildung A 4 bis Abbildung A 8). Aufgrund der relativ geringen Fugenbreite konnten nur kleine Mengen an Probenmaterial entnommen werden (siehe Tabelle A 4 im Anhang).

3.2 Chemisch-mineralogische Kennwerte der historischen Mörtel

Bei den Mörteln der Kirchen in Pöhlde und Dorste handelt es sich um nahezu reine Gipsmörtel.

In Pöhlde finden sich zwei Arten von Gipsmörteln: ein gotischer Mörtel und ein später datierter Mörtel aus dem Barock [mündliche Mitteilung durch Herrn R. Lenz, Restaurator], die sich optisch und bezüglich weiterer Eigenschaften unterscheiden.

Der gotische Mörtel zeigt eine leichte Graufärbung und enthält deutlich erkennbare Holzkohlepartikel (Reste verkohlten Brennmaterials). Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Mörtel ist jedoch weitestgehend gleich: Reste von durchschnittlich 11 M.-% nichthydratisiertem Sekundäranhydrit sind vor allem in gröberen Körnern zu finden, wie mittels Dünnschliffmikroskopie gezeigt werden kann (Abbildung 6).

Der häufig zu beobachtende „Calcitschleier“ (Abbildung 5) am Rande solcher Grobkörner weist auf die Art der Herstellung des Bindemittels, einen Hochbrand mit Entsäuerung, hin [Lucas 92]. Der Carbonatgehalt der Proben liegt bei ca. 1,3 M.-%.

Darüber hinaus enthalten die Proben säureunlöslichen Zuschlag (Abbildung 7), jedoch in so geringen Mengen (ca. 1,1 M.-%), daß man davon ausgehen muß, daß es sich dabei um Verunreinigungen des gebrannten Materials handelt. Dieser Zuschlag setzt sich aus Quarz, Talk und weiteren, nicht näher bestimmbar Silicaten zusammen. Beim gotischen Gipsmörtel sind diese Bestandteile in geringerer Menge vorhanden und weitestgehend durch die bereits erwähnten Holzkohlepartikel ersetzt, die diesem Mörtel auch die graue Farbe verleihen.

Abbildung 5: Polarisationsmikroskopische Aufnahme (gekreuzte Polarisatoren) der Mörtelprobe D1 aus Dorste. Die Abbildung zeigt den Übergang von groben Gipskristallen (in Poren oder Grobkorn) zur feineren Gipsmatrix



Abbildung 6: Polarisationsmikroskopische Aufnahme (gekreuzte Polarisatoren) des Fugenmörtels P5. Zu erkennen sind Reste nicht hydratisierten Anhydrits innerhalb eines Grobkorns in der feineren Gipsmatrix

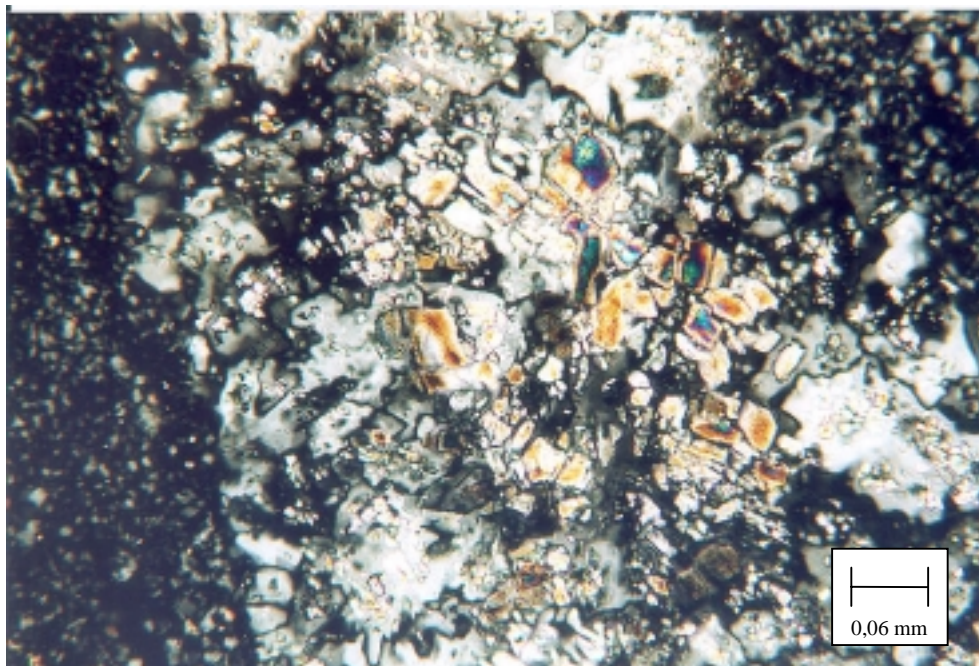
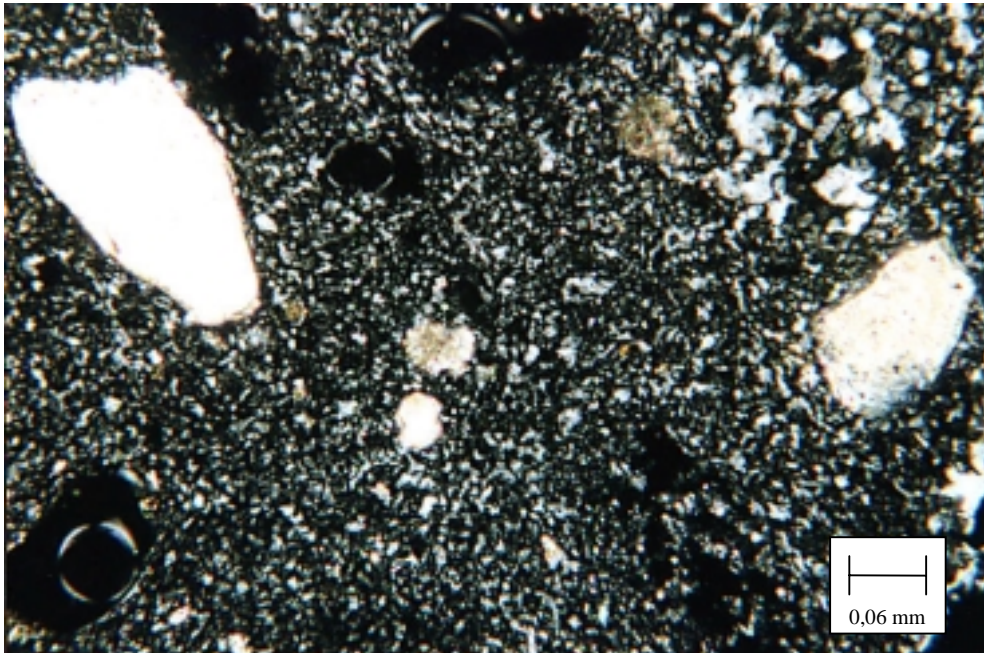


Abbildung 7: Polarisationsmikroskopische Aufnahme (gekreuzte Polarisatoren) des Mörtels D4 aus Dorste. Quarzitischer Zuschlag innerhalb der Gipsmatrix



Der Gipsmörtel der St. Cyriaci-Kirche in Dorste unterscheidet sich chemisch-mineralogisch kaum von den Gipsmörteln der Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde, es findet sich in Dorste jedoch nur eine Varietät. Die „Verunreinigungen“ durch Quarz und Silikate sind bei dem Gipsmörtel aus Dorste geringer (ca. 0,5 M.-%) und auch die Anteile an Anhydrit (ca. 7,5 M.-%) und Carbonat (ca. 0,8 M.-%) liegen im Mittel unter den Werten der Mörtel aus Pöhlde. Weiterhin wurde die Salzbelastung der Mörtel, sowie des Steinmaterials untersucht. Es konnte keine auffällig hohe Salzbelastung festgestellt werden.

Die folgende Tabelle 3 zeigt ausgewählte Kennwerte der historischen Mörtel.

Tabelle 3: Chemisch-mineralogische Zusammensetzung, und Salzbelastung der Mörtel aus Pöhlde und Dorste

	säureunlöslicher Zuschlag [M.-%]	Gips [M.-%]	Anhydrit [M.-%]	Carbonat [M.-%]	lösliche Salze gesamt [M.-%]
Johannes-Servatius-Kirche Pöhlde					
Varietät a „barock“ (ermittelt an 4 Proben)	1,0 - 1,3	72,8 – 87,4	7,9 – 18,5	1,1 - 1,5	0,1 – 0,8
Mittel	1,1	83,5	11,3	1,3	0,5
Varietät b „gotisch“ (1 Probe)	0,5	87,0	10,2	1,1	0,4
St. Cyriaci-Kirche Dorste					
(ermittelt an 5 Proben)	0,4 – 0,7	88,4 – 90,2	6,8 – 9,6	0,6 – 1,5	0,1 – 0,3
Mittel	0,5	88,8	7,5	0,9	0,2
Salzbelastung					
Mörtel Pöhlde (ermittelt an 4 Proben)	Na⁺	0,003 – 0,057 M.-%		F⁻	0,016 – 0,018 M.-%
	K⁺	0,001 – 0,065 M.-%		Cl⁻	0,007 – 0,013 M.-%
	Mg²⁺	0,014 – 0,061 M.-%		NO₃⁻	0,181 – 0,503 M.-%
Mörtel Dorste (ermittelt an 5 Proben)	Na⁺	0,002 – 0,033 M.-%		F⁻	0,018 – 0,019 M.-%
	K⁺	0,001 – 0,003 M.-%		Cl⁻	0,006 – 0,062 M.-%
	Mg²⁺	0,019 – 0,054 M.-%		NO₃⁻	0,021 – 0,101 M.-%

3.3 Physikalisch-mechanische und hygrische Kennwerte der historischen Mörtel

An den historischen Proben wurden, wo es aufgrund der Probengröße möglich war, weitere Kennwerte bestimmt. Für eine Anpassung der Saniermörtel an das Altmaterial wurden der dynamische E-Modul nach KOTTAS, Biegezug- und Druckfestigkeiten nach EN 196-1 sowie der Wasseraufnahmekoeffizient der Mörtel ermittelt.

Die Druckfestigkeiten der getrockneten Mörtelproben aus Pöhlde liegen mit 6,2 N/mm² (Tabelle 4) weit unter den Werten, die in der Literatur für historische Gipsmörtel genannt werden (LUCAS 95, MIDDENDORF 91), und die auch durch eigene Untersuchungen bestätigt

werden konnten (siehe Tabelle A 2). An historischen Gipsputzen (vgl. STÜRMER) wurden jedoch noch deutlich geringere Werte nachgewiesen.

Tabelle 4: Mechanische und hygrische Kennwerte historischer Gipsmörtel der Kirchen in Pöhlde und Dorste

Probe		Pöhlde			Dorste
		P1	P4	P5 (got.)	D4
Dyn. E-Modul	[kN/mm ²]	12,3	11,0	8,0	-
Biegezugfestigkeit	[N/mm ²]	2,7	3,0	3,0	-
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	6,9	5,4	6,2	-
Wasseraufnahme	[M.-%]	11,1	10,9	-	4,0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m ² √h]	4,3	6,3	-	0,8

Trotz niedriger Biegezug- und Druckfestigkeiten (z.B. P1, P4) weisen die Proben vergleichsweise hohe E-Moduln auf ($E_{dyn}=12,3$ kN/mm² bei $\beta_D=6,9$ N/mm², P1). Dies sollte bei der Entwicklung von Reparaturmörteln berücksichtigt werden (Kap. 5).

Ein relativ niedriger Wasseraufnahmegrad (ca. 4 M.-%) und Wasseraufnahmekoeffizient (ca. 0,76 kg/m²√h) wurde bei den Mörteln aus Dorste nachgewiesen. Moderne Gipsbaustoffe weisen vielfach höhere Werte auf (Gipsbauplatte, vgl. STARK 97). Ein sehr dichtes Gefüge oder der Einsatz von hydrophobierenden Zusatzmitteln können die Ursache für solche niedrigen Werte sein. Der Einsatz von hydrophobierenden Zusatzmitteln konnte hier nicht belegt werden, es ist aber davon auszugehen, daß auch hier Prozesse der Umkristallisation in der Verdunstungszone des Mörtels allmählich zu einer Verdichtung des Gefüges führten.

Die Mörtel der Johannes Servatius-Kirche in Pöhlde zeigen mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten von ca. 5 kg/m²√h (P1, P4) ein Saugverhalten vergleichbar mit Kalk-Zement-Mörteln. Die erhöhten Werte korrelieren mit einer höheren Gesamtporosität, wie in Kap. 3.4.1 beschrieben.

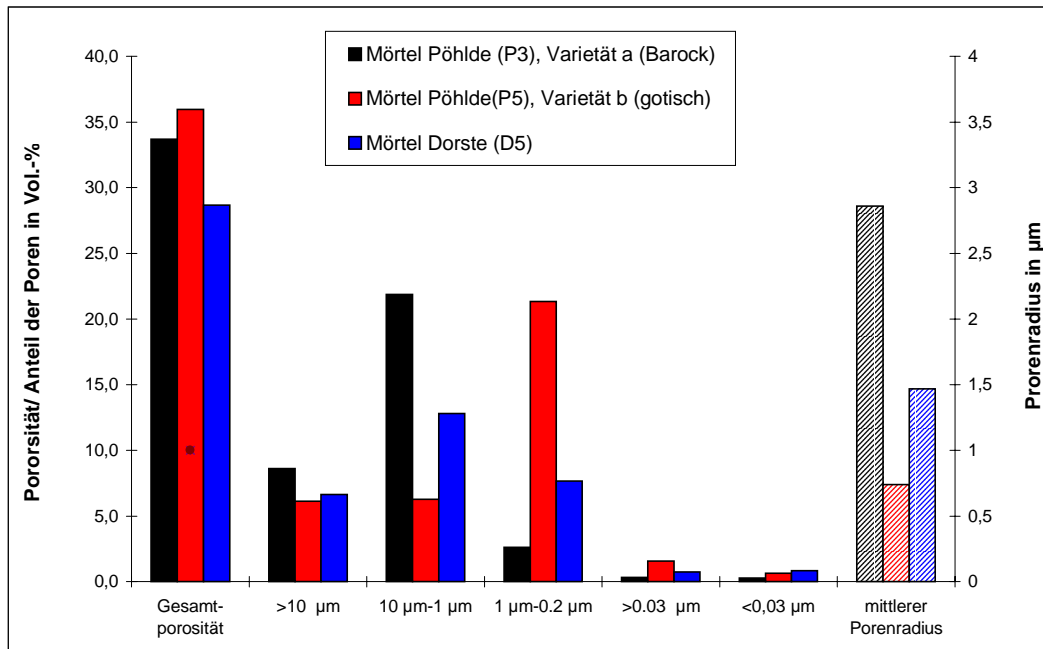
3.4 Gefügeuntersuchungen

3.4.1 Porosität und Porenradienverteilung der historischen Mörtel

An den Proben der Kirchen in Pöhlde und Dorste wurde die Porenradienverteilung bzw. die Porosität der Proben mittels Hg-Druckporosimetrie untersucht.

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung. Weitere Kenndaten, die das Gefüge der Mörtel beschreiben, finden sich in Tabelle A 5 im Anhang.

Abbildung 8: Ergebnisse der Hg-Druckporosimetrie an historischen Mörtelproben der Kirchen Johannes-Servatius in Pöhlde und St. Cyriaci in Dorste



Während die Gesamtporosität bei allen untersuchten Proben der Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde nahezu vergleichbar ist (ca. 33-35 Vol.-%), unterscheidet sich der gotische Mörtel (P5) von den ebenfalls untersuchten Proben P1, P3 und P4 bezüglich der Porenradienverteilung. Das Maximum der Porenradienverteilung und der mittlere Porenradius liegen bei kleineren Poren (0,7-0,8 µm).

Die Gesamtporosität der Mörtel der St. Cyriaci-Kirche liegt mit ca. 28 Vol.-% unter dem Durchschnittswert der Mörtel aus Pöhlde. Auch die Porenradienverteilung unterscheidet sich von den Mörteln aus Pöhlde. Die Proben aus Dorste zeigen einen mittleren Porenradius von ca. 1,5 µm. Der Anteil der für den Feuchtetransport im Baustoff verantwortlichen Kapillarporen ist geringer.

Die Porositäten entsprechen in etwa den Werten, die auch bei anderen Untersuchungen historischer Gipsmörtel gefunden wurden [LUCAS 95].

Nach HENNING werden bei wechselnden Klimabedingungen (Durchfeuchtung/Trocknung), wie sie in der Praxis vorzufinden sind, zunächst die Mikroporen durch Kristallisationsprodukte verfüllt. Bei weiterem Fortschritt der Kristallisationsvorgänge findet auch in den Makroporen ein Aufwachsen von Gipskristallen statt. Diese Prozesse haben damit eine Verringerung der Gesamtporosität, sowie eine Vergrößerung des mittleren Porenradius zur Folge.

Daß solche Vorgänge auch bei den untersuchten Proben aus Dorste und Pöhlde eine Rolle spielten, kann aufgrund der Ergebnisse der Rasterelektronen- und Polarisationsmikroskopie vermutet werden (siehe Abbildung 5 und Abbildung 14).

3.4.2 Rasterelektronenmikroskopie

Neben der qualitativen Analyse der historischen Mörtelproben mittels Polarisationsmikroskop wurden die Proben mittels Rasterelektronenmikroskop untersucht, um zusätzliche Erkenntnisse über die Kristallausbildung und das Gefüge zu gewinnen.

Abbildung 9 zeigt eine Probe der Kirche in Dorste mit relativ dichtem Gefüge.

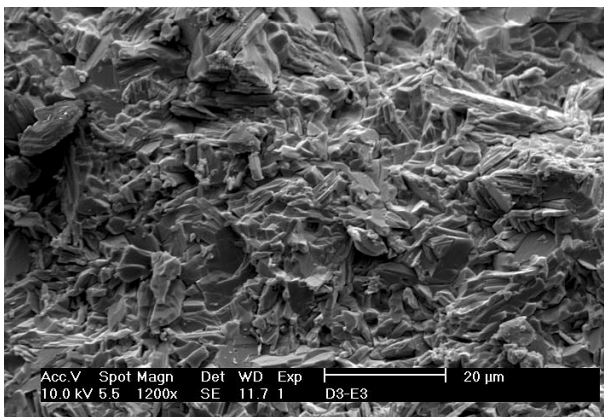


Abbildung 9:
Mörtelprobe D3 aus Dorste mit dichter Gefügeausbildung

Der leicht grau gefärbte Mörtel aus vermutlich gotischer Zeit (LENZ) weist ein etwas offeneres Gefüge auf. Die Gipskristalle sind eher prismatisch als nadelig geformt und teilweise – vermutlich durch Lösungsprozesse – abgerundet (Abbildung 10).

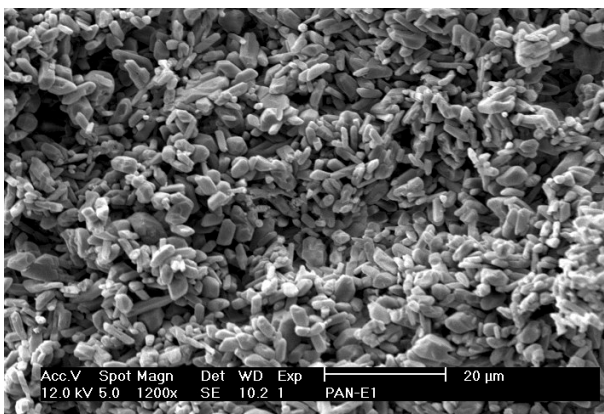


Abbildung 10:
Mörtel aus Pöhlde, Varietät b („gotisch“), mit relativ offenem Gefüge und prismatischer Kristallausbildung

Abbildung 11 zeigt Teile eines Kohlepartikels (Reste des Brennmaterials bei Herstellung) des graufarbenen Mörtels aus Pöhlde.

Die Schichtsilikate, die in geringen Mengen in allen untersuchten Proben im Rahmen der qualitativen Phasenanalyse (RBA) gefunden wurden, lassen sich auch mittels Rasterelektronenmikroskopie nachweisen (Abbildung 12).

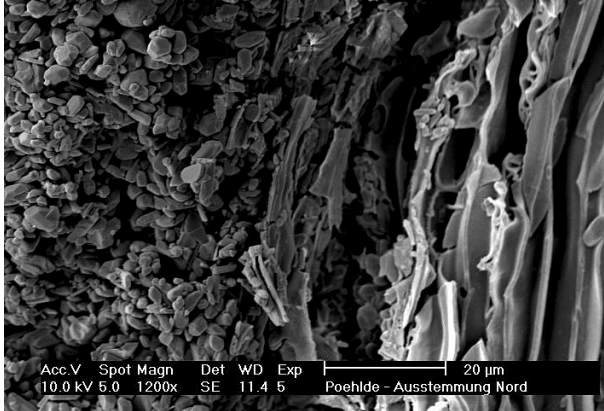


Abbildung 11:
Mörtel Pöhlde, Varietät b („gotisch“), Reste verkohlten Brennmaterials

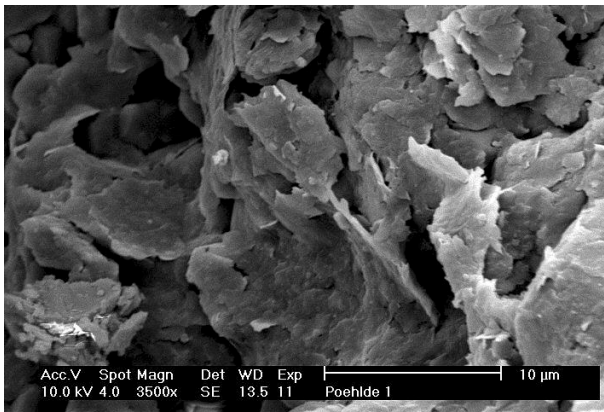


Abbildung 12:
Tafelige Schichtsilikate im Mörtel aus Pöhlde, Varietät a („barock“)

Schäden der Mörtel aus Pöhlde und Dorste durch biogenen Befall ließen sich im Rahmen der Untersuchungen nicht feststellen. In allen Fällen wurde aber ein deutlicher Befall durch Mikroorganismen festgestellt, wie die Abbildung 13 zeigt.



Abbildung 13:
Befall durch Mikroorganismen in perlenschnur-artiger Form im Mörtel D5 aus Dorste

Erhöhte Nitratgehalte, wie sie bei den untersuchten Mörteln gefunden wurden, können jedoch ein Hinweis auf das Vorhandensein lithoautotroper Bakterien sein. Solche Bakterien scheiden Schwefel- oder Salpetersäure aus [WARSCHEID] und können so eine Mörtelschädigung durch lösenden Angriff des Bindemittels verursachen.

Bereiche, in denen neben der stark verfilzten Gipsmatrix gut ausgebildete derb-prismatische Gipskristalle auftreten, lassen sich auch unter dem Rasterelektronenmikroskop erkennen (Abbildung 14). Eine solche Kristallausbildung tritt auf, wenn durch Lösungstransport Gips in Poren erneut auskristallisiert oder die ursprünglich vorhandenen groben Anhydrit-Körner hydratisieren (siehe auch Abbildung 6).

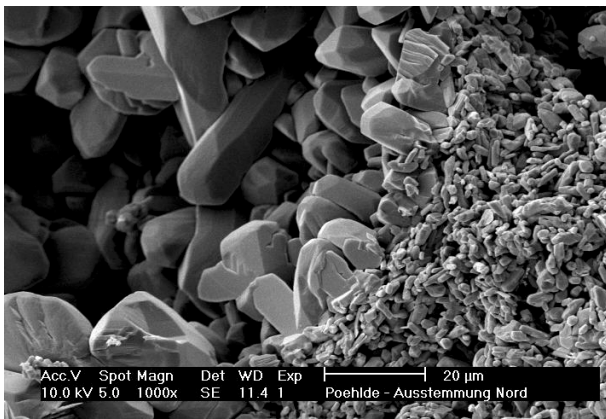


Abbildung 14:

Mörtel Pöhlde, Varietät b, grobe, derb-prismatische Gipskristalle in einer Pore innerhalb der feineren Gipsmatrix

Bei der Untersuchung der Proben mittels REM finden sich vereinzelt Bereiche, in denen die Kristalle stark gerichtet erscheinen (Abbildung 15). Vermutlich handelt es sich dabei um „Rinnen“, die durch andauernden kapillaren Wassertransport und eine beginnende Auflösung des Materials entstehen. An feucht gelagerten Proben konnten im Labor ähnliche Gefügeänderungen beobachtet werden (siehe 4.2.6).

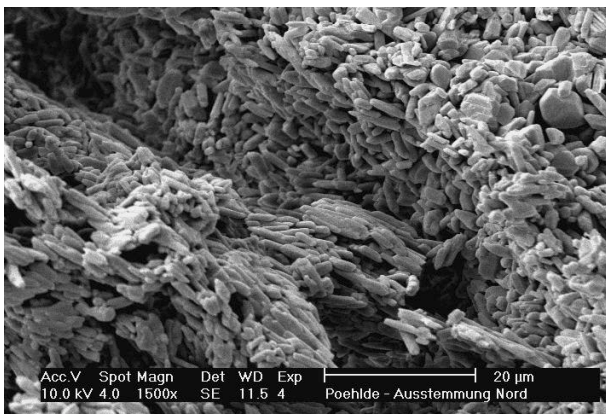


Abbildung 15:

„Lösungsrinne“ mit gerichteten Kristallen im älteren Mörtel der Kirche Johannes-Servatius in Pöhlde

3.5 Fazit der Untersuchungen

Bei den untersuchten historischen Gipsmörteln handelt es sich wohl um sogenannte „Hochbrandgipse“ [LUCAS 92]. Dies wird durch die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Phasenanalyse, vor allem durch die Ergebnisse der Lichtmikroskopie belegt.

Für die Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel wurde daher die Verwendung von Anhydrit als Bindemittel untersucht.

Weiterhin enthielten die historischen Gipse herstellungsbedingt (Brennen des Gipssteins, anschließend grobe Zerkleinerung des gebrannten Materials) große Anteile an Grobkorn in der feineren Gipsmatrix. Neben dem optischen Aspekt ist die Verwendung eines Zuschlags (Anhydrit-, Gips- oder Kalkstein) auch aus Gründen der Verarbeitbarkeit (siehe Kap. 5) empfehlenswert.

Mittels Mikroskopie wurden Hinweise auf Gefügeänderungen (Prozesse der Umkristallisation und verspätete Hydratation, z.B. Verfüllung von Poren) des ursprünglichen Mörtels gefunden. Vergleichbare Veränderungen konnten später bei der Prüfung auf Wasserresistenz an den Labormörteln beobachtet werden (siehe Kap. 4).

4 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Beurteilung der Wasserresistenz

Bauwerke mit Jahrhunderte alten Gipsmörteln belegen, daß der Baustoff Gips, trotz einer erhöhten Löslichkeit im Vergleich zu Kalk- oder Zementmörteln, eine gewisse Wasserresistenz aufweist. Die Löslichkeit von Calciumsulfat-Dihydrat in Wasser ist bei gegebener Temperatur konstant, die Lösungsgeschwindigkeit ist jedoch von vielen Faktoren abhängig. Ob und in welchem Maße es innerhalb der Standzeit von Bauwerken zu einer Auflösung des Gipsbaustoffes und damit zu einer Schädigung kommt, wird u.a. durch die klimatischen Bedingungen, die Exposition des Bauteils oder das Gefüge des Gipsbaustoffes bestimmt.

Da der Einsatz des Baustoffes Gips heute vorwiegend im Innenbereich gesehen wird, existieren keine genormten Prüfverfahren, um eine Wasserbeständigkeit von Gipsmörteln zu untersuchen (siehe auch Kap. 1.3.2). Vor der Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel steht daher die Entwicklung geeigneter Prüfverfahren zur Untersuchung dieser Wasserresistenz.

4.1 Lagerung und Herstellung der Bindemittelpasten

Schäden an Gipsmörteln entstehen bei einer Anwendung im Außenbereich durch einen lösenden Angriff bzw. durch Lösungstransport und erneute Kristallisation. Dies kann zu Treiberscheinungen, Krustenbildung, Abplatzungen etc. führen.

Diese Praxisbedingungen wurden mit den in Kapitel 2.5 beschriebenen Prüfmethoden im Labor nachgestellt:

- I. Lösungsverhalten in destilliertem Wasser
Korngröße 1-2 mm, 1 h Rühren in dest. Wasser
- II. Lagerung in fließendem Wasser
Lagerung von Kleinprismen in fließendem Wasser
- III. Ständige Wasseraufnahme durch kapillares Saugen
Kapillare Wasseraufnahme von Normprismen über die Stirnfläche, Tauchtiefe: 1 cm
- IV. Beregnung/Trocknung
1 h Beregnung von Normprismen, anschließend 3 bzw. 4 d Trocknung bei 40 °C
- V. Kapillares Saugen/Trocknung
 - a) Saugen über die Stirnfläche, Dauer: 105 min, anschließend 3 - 4 d Trocknung bei 40 °C
 - b) Saugen über die Seitenfläche bis zur vollständigen Durchfeuchtung, anschließend 3 - 4 d Trocknung bei 40 °C

Um die Effizienz dieser Methoden beurteilen zu können, wurden zehn Rezepturen ausgewählt, die bereits in Vorversuchen auf ihre Beständigkeit bezüglich eines lösenden Angriffs (Lagerung in fließendem Wasser, siehe Kapitel 2.5) untersucht worden waren. Unter diesen Mischungen befanden sich sowohl Bindemittelpasten mit sehr niedriger als auch relativ hoher Beständigkeit gegenüber diesem lösenden Angriff.

Zum Einsatz kamen reine Gipspasten sowie mit weiteren Bindemitteln/Zusatzstoffen modifizierte Pasten. Folgende Mischungen wurden untersucht:

Reine Gipspasten:

	Probenbezeichnung
100 % α -Halbhydrat	⇒ α-HH
100 % β -Halbhydrat	⇒ β-HH
100 % Naturanhydrit	⇒ NA
100 % Thermoanhydrit (REA)	⇒ TA

Modifizierte Rezepturen:

	Probenbezeichnung
90 % Thermoanhydrit, 10 % Weißkalkhydrat CL80	⇒ TA/CL 91
80 % Thermoanhydrit, 20 % Weißkalkhydrat CL80	⇒ TA/CL 82
80 % Thermoanhydrit, 20 % Hydraulischer Kalk HL2	⇒ TA/HL 82
70 % Thermoanhydrit, 30 % Hydraulischer Kalk HL2	⇒ TA/HL 73
80 % Thermoanhydrit, 10 % Hüttensand, 10 % Weißkalkhydrat CL80	⇒ TA/Hüs/CL 8.1.1
40 % Thermoanhydrit, 10 % Weißkalkhydrat CL80, 50 %: Kalksteinmehl	⇒ TA/CL/Kstm 4.1.5

Die Herstellung der Bindemittelpasten erfolgte in Anlehnung an DIN 1168, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Die Bindemittelpasten wurden einheitlich auf ein Ausbreitmaß von $16,5 \pm 0,5$ cm eingestellt.

Ausgesuchte Kennwerte dieser Rezepturen sowie charakteristische Werte der Bindemittelkomponenten finden sich in Kapitel 5.2 und 5.4 bzw. im Anhang (Tabelle 5, Tabelle A 12, Tabelle A 15).

Eine Dokumentation der auftretenden Schäden erfolgte durch die Kontrolle der Massenänderungen (z.B. bei lösendem Angriff), des Quellen/Schwindens und der E-Moduln, sowie durch optische Begutachtung während der oben beschriebenen Lagerungen.

Änderungen des Gefüges wurden exemplarisch mittels Mikroskopie (REM) bzw. Hg-Druckporosimetrie untersucht.

Ergänzend zu den oben beschriebenen Prüfmethoden wurden Musterflächen mit ausgewählten Rezepturen angelegt. Diese Musterflächen (Ziegelmauern der Größe 1 m x 1 m, siehe Kap. 4.3) erlauben bedingt eine Einordnung der Ergebnisse aus den Laborversuchen.

Im folgenden werden die Veränderungen der Kennwerte während den unterschiedlichen Lagerungen beschrieben. Den in Kapitel 5 beschriebenen Ergebnissen wird dabei teilweise vorgegriffen.

4.2 Änderungen der Eigenschaften durch Konstant- und Wechsellagerungen

4.2.1 Massenänderungen

Als häufigster Schaden an Gipsmörteln im Mauerwerk ist der Materialverlust zu nennen, der infolge von Lösungsvorgängen durch oberflächlich ablaufendes Wasser beobachtet werden kann. Als Schadensbild tritt z.B. ein Rückwittern der Fugen auf. Die Auflösungsgeschwindigkeit des Gipsbaustoffs in der Praxis unterliegt nach LUCAS 95 einem Gesetz zweiter Ordnung, ist aber abhängig von der Art des untersuchten Gipsbaustoffes (Gipsstein, Gipsputz). Der Massenverlust bei gegebenen Bedingungen (z.B. mechanische Beanspruchung, Temperatur) ist daher ein Kriterium für die Wasserresistenz eines Mörtels.

Eine Massenzunahme kann langfristig ebenfalls zu einer Schädigung des Mörtels führen, und zwar dann, wenn mit dieser Massenzunahme z.B. Quellprozesse verbunden sind, die eine Gefügezerstörung bewirken (Rißbildung). Dies kann z.B. der Fall sein bei einer Hydratation des Anhydrits zum Calciumsulfat-Dihydrat im bereits erhärteten Mörtel.

Das folgende Diagramm (Abbildung 16) zeigt die Massenänderungen ausgewählter Mischungen im Vergleich aller in Kap. 2.5 genannten Prüfmethoden/Lagerungen. Dargestellt ist der Masseverlust / die Massenzunahme der erhärteten Bindemittelpasten nach 28 Tagen bzw. nach Beendigung der entsprechenden Lagerung (bei Methode I).

Abbildung 16: Massenänderung ausgewählter erhärteter Bindemittelpasten nach 28 Tagen bzw. nach Beendigung der Prüfverfahren

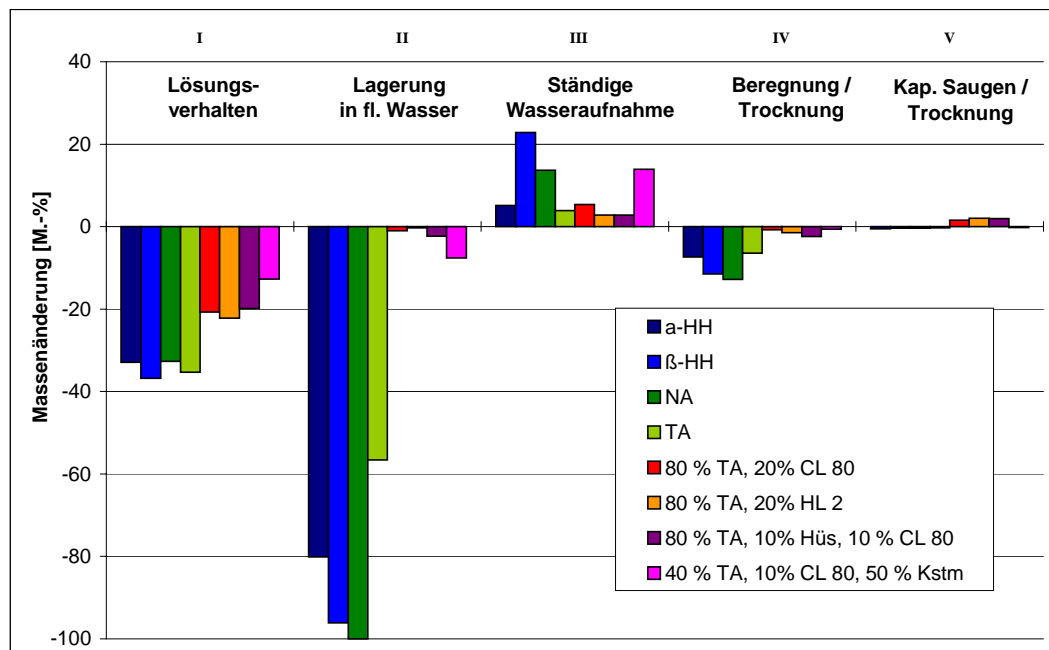


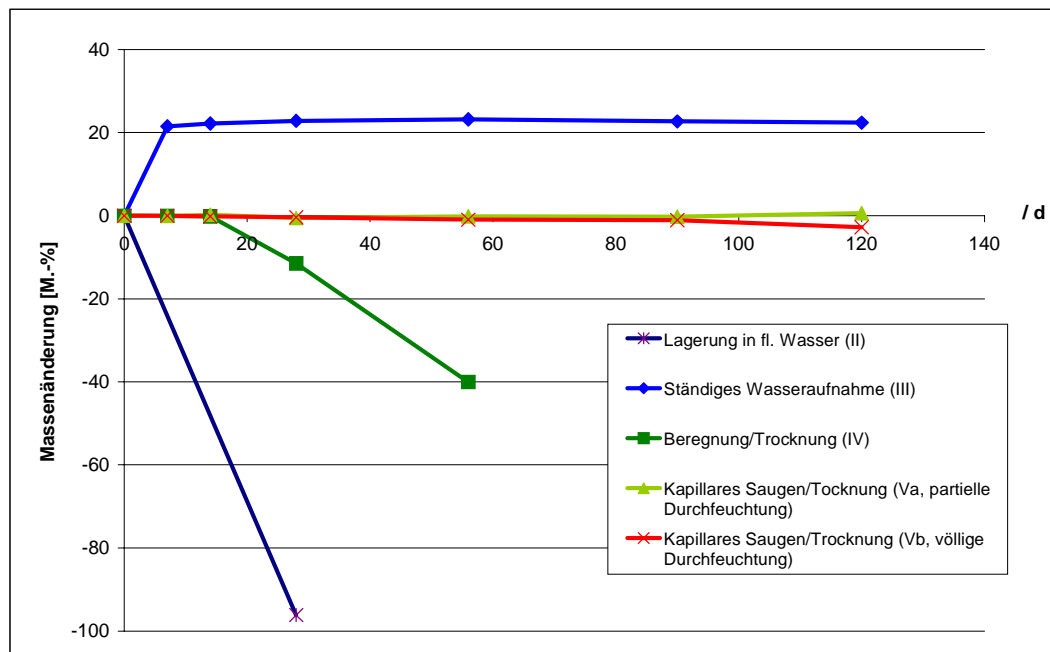
Abbildung 16 zeigt, daß Schäden durch Materialverlust bei den Verfahren I, II und IV besonders groß sind. Nach 28 Tagen bzw. nach Beendigung des Verfahrens können auch aufgrund eines leichten mechanischen Abriebs (z.B. durch „Schlagregen“- Methode IV) starke Masseverluste beobachtet werden. Diese Lösungserscheinungen sind bei anhaltendem Kontakt mit dem Lösungsmittel (Methode II) besonders deutlich. Das kann zu einer vollständigen Auflösung der Probe (z.B. NA, β-HH) führen.

Die Wechsellagerungen V(a) (partielle Durchfeuchtung) und V(b) (vollständige Durchfeuchtung, hier nur V(b)), bei denen eher der Prozeß der Umkristallisation von Bedeutung ist, haben weniger großen Einfluß auf die Massenänderungen.

Mit fortschreitender Lagerungsdauer werden die Unterschiede der Verfahren immer deutlicher - der Masseverlust, den man bei Lagerung in fließendem Wasser und bei Beregnung beobachten kann, nimmt weiterhin zu. Auch bei der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen (Methode III und V) treten im Kontaktbereich mit Wasser letztendlich Lösungsschäden auf.

Die Massenänderungen in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer zeigt Abbildung 17 am Beispiel der erhärteten Bindemittelpaste auf β-HH-Basis.

Abbildung 17: Massenänderung der Probe β -HH in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlicher Lagerung



Auf Unterschiede im Lösungsverhalten, die sich durch die Rezeptur der Bindemittelpasten ergeben, soll hier nur am Rande eingegangen werden (siehe auch Kapitel 5): die reinen Gipspasten (α -HH, β -HH, TA und NA) weisen fast immer die deutlicheren Effekte auf. Sie zeigen stets die größte Massenabnahme und bei der Methode III (ständiges kapillares Saugen) auch eine deutliche Massenzunahme. Diese Massenzunahme ist vorwiegend auf die Wasseraufnahme der Bindemittel zurückzuführen, da die Wägung der Probekörper versuchsbedingt im durchfeuchteten Zustand erfolgte.

4.2.2 Längenänderungen

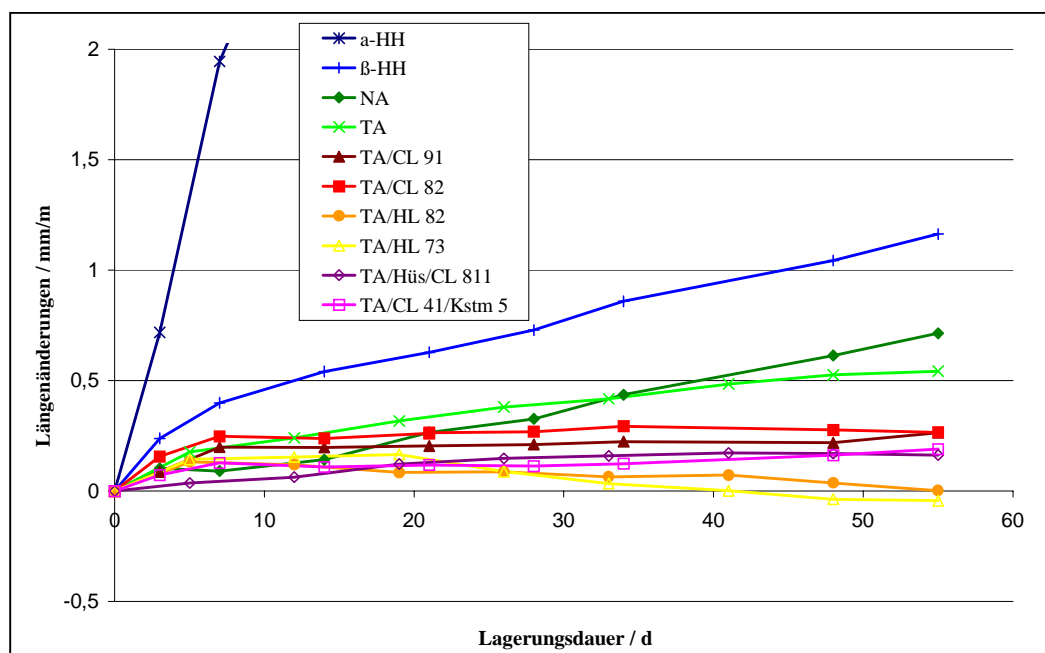
Eine positive Eigenschaft der Gipsbaustoffe ist die im Vergleich mit anderen Bindemitteln geringe Längenänderung, die bei trockenen Bedingungen erreicht wird (Beton: 0,2 – 0,5 mm/m, Gipsestrich: 0,15 mm/m, MÜLLER). Kommt es bei wechselnder oder anhaltender Feuchte zu einem Lösungstransport und erneuter Kristallisation, kann dies ein Quellen des Mörtels verursachen (bis zu 4 mm/m, vgl. GRIMME, ENGELKE). Auch sekundäre Reaktionen, wie z.B. die Reaktion Anhydrit-Gips oder eine Ettringitbildung (bei Reaktion mit vorhandenen Aluminaten), können Ursache für solche Quellprozesse sein [OTTEMANN, KNÖFEL 79]. Bei der Durchfeuchtung von Baustoffen kann zusätzlich ein reversibles Quellen aufgrund der Wasseraufnahme auftreten.

Mit der Messung der auftretenden Längenänderungen sollte beurteilt werden, inwieweit die verschiedenen Gipsmörtel bei den in Kap. 2.5 beschriebenen Beanspruchungen solchen Schadensprozessen unterliegen.

Das Quellen und Schwinden der erhärteten Bindemittelpasten wurde während der 28-tägigen Vorlagerung, sowie während der Untersuchung der Wasserresistenz verfolgt. Bei den Methoden I und II war die Untersuchung des Quell-/Schwindverhaltens aus technischen Gründen (Probengröße bzw. hoher Masseverlust) nicht möglich.

Lagerungen, bei denen eine Wasseraufnahme, sowie die Möglichkeit zur Verdunstung gegeben ist (III, IV, Va, Vb), fördern bei fast allen Mischungen Quellprozesse. Dies zeigt die folgende Abbildung 18 am Beispiel der Lagerung III (ständige kapillare Wasseraufnahme).

Abbildung 18: Längenänderungen der erhärteten Bindemittelpasten bei Lagerung III (Ständige kapillare Wasseraufnahme) in Abhängigkeit der Lagerungsdauer



Ein Vergleich des Quell-/Schwindverhaltens der einzelnen erhärteten Bindemittelpasten zeigt, daß bei diesen Quellprozessen die Zusammensetzung bzw. die Rezeptur der Mischungen eine größere Rolle spielt, als bei der Betrachtung der Massenänderungen. Das läßt darauf schließen, daß die beobachteten Quellprozesse weniger durch Lösungstransport und anschließende Kristallisation, sondern eher durch sekundäre Hydratationsreaktionen verursacht werden.

Eine konstante Feuchtlagerung (III) verursacht ein stärkeres Quellen als die Wechsellagerungen IV, Va und Vb, bei denen einige Mischungen durch die Trocknung bei 40 °C zunächst ein Schwinden zeigen (Abbildung 19). Mit andauernder Wechsellagerung

(nach ca. 20 d, jedoch abhängig von der Zusammensetzung) tritt bei fast allen Mischungen ein Quellen auf. Das Quellen ist dabei um so deutlicher, je größer die absolut aufgenommene Menge Wasser ist (Abbildung 20), d.h. je länger der Wasserkontakt andauert ($III > Vb > Va > IV$).

Abbildung 19: Längenänderungen bei unterschiedlicher Lagerung am Beispiel der erhärteten Bindemittelpaste NA

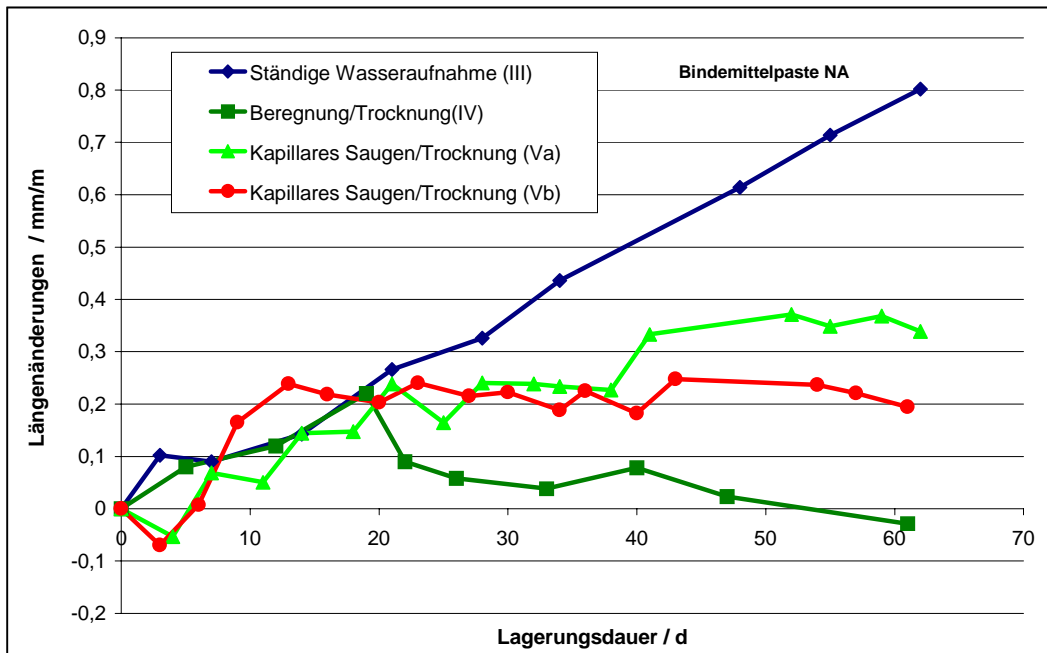
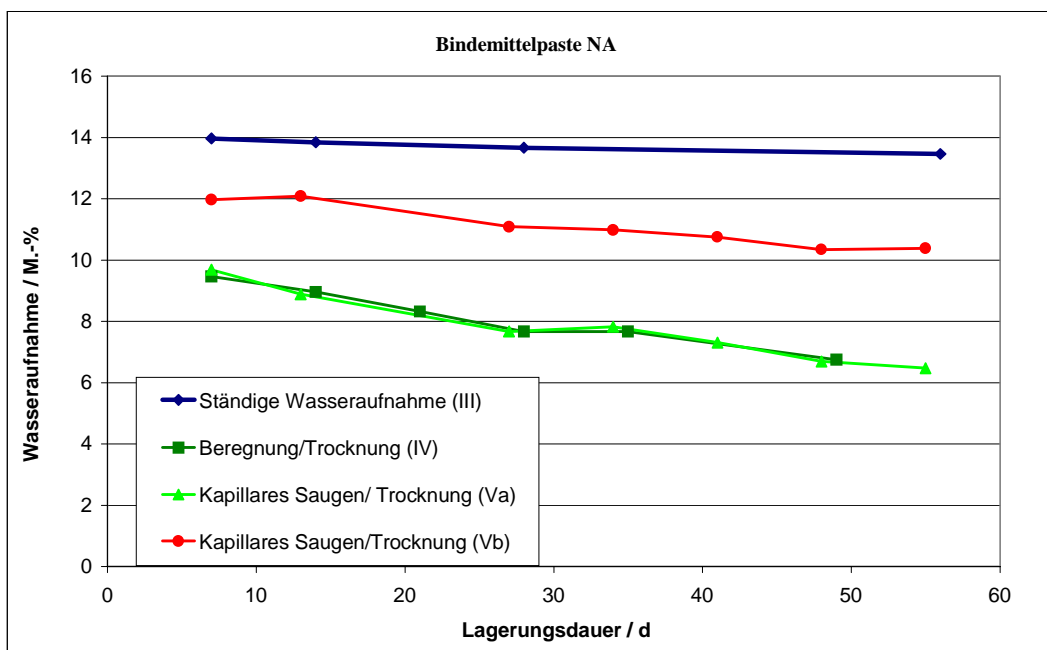
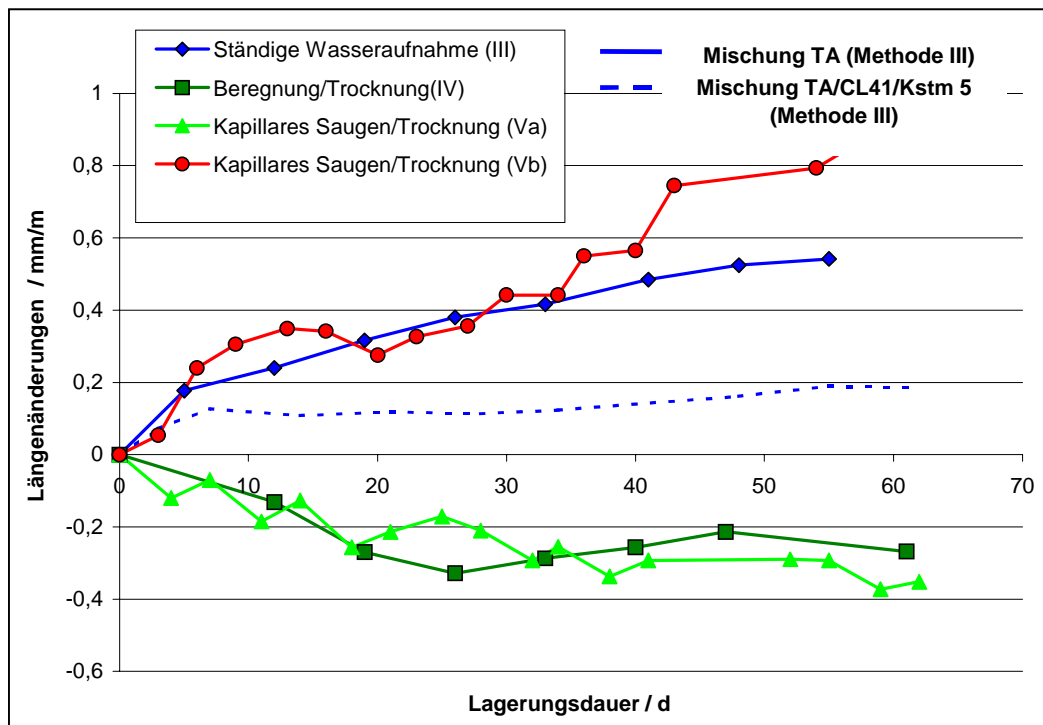


Abbildung 20: Prozentuale Wasseraufnahme der erhärteten Bindemittelpaste NA bei Feucht- und Wechsellagerung, bezogen auf das Ausgangsgewicht



Mit Kalk oder anderen Zusatzstoffen modifizierte Mischungen weisen im Vergleich zu den reinen Calciumsulfat-Mischungen (α -HH, β -HH, NA, TA) teilweise deutlich geringere Quell- bzw. Schwindwerte auf, wie anhand der Mischung mit Kalk und Kalksteinmehl in Abbildung 21 dargestellt. Auch bei anderen Lagerungen (IV, Va, Vb) lassen sich diese Tendenzen erkennen.

Abbildung 21: Längenänderung mit zunehmender Lagerungsdauer am Beispiel der Mischung TA und – zum Vergleich - der Mischung TA/CL 41 /Kstm 5



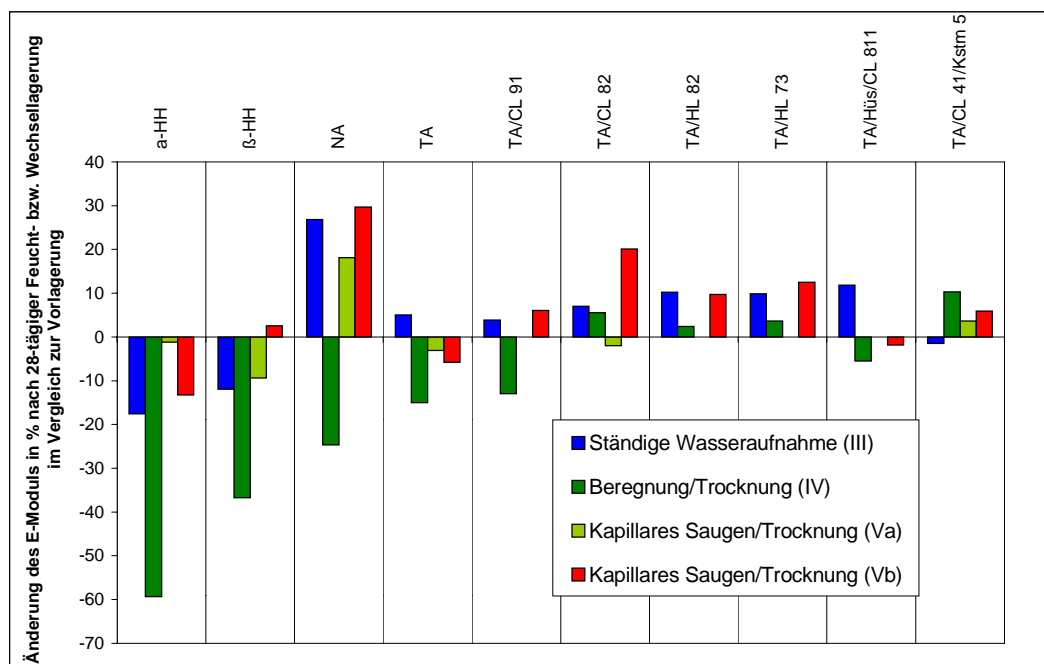
4.2.3 Änderungen des dyn. E-Moduls

Werden durch Prozesse wie Auflösung und Kristallisation Störungen im Gefüge eines Baustoffs verursacht, so ist mit diesen Schäden in der Regel auch eine Änderung des dynamischen E-Moduls verbunden. Bei einzelnen Mischungen (α -HH, β -HH, NA, TA) konnten schon bei relativ geringen Längenänderungen Risse beobachtet werden. Die Untersuchung des dyn. E-Moduls ist daher eine geeignete Ergänzung - neben der Messung der Längenänderungen - um solche Schäden zu dokumentieren.

Die E-Moduln der einzelnen Mischungen wurden nach Abschluß der 28-tägigen Vorlagerung und im Verlauf der weiteren Lagerungen zur Untersuchung der Wasserresistenz gemessen. Da es sich bei den Methoden I und II um zerstörende Prüfungen handelte, konnten die E-Moduln im Anschluß nicht ermittelt werden.

In der Abbildung 22 ist die prozentuale Änderung der E-Moduln nach 28-tägiger Feucht- bzw. Wechsellagerung im Vergleich zu den Werten nach der Vorlagerung dargestellt. Wiedergegeben wird die Änderung, die durch die entsprechende Lagerung (III-Vb) an den einzelnen Mischungen hervorgerufen wird. Der Nullpunkt stellt den Wert nach Beendigung der Vorlagerung dar.

Abbildung 22: Prozentuale Änderung des dyn. E-Moduls durch Feucht- oder Wechsellagerung bezogen auf die Lagerung bei 23/50 nach 28 d



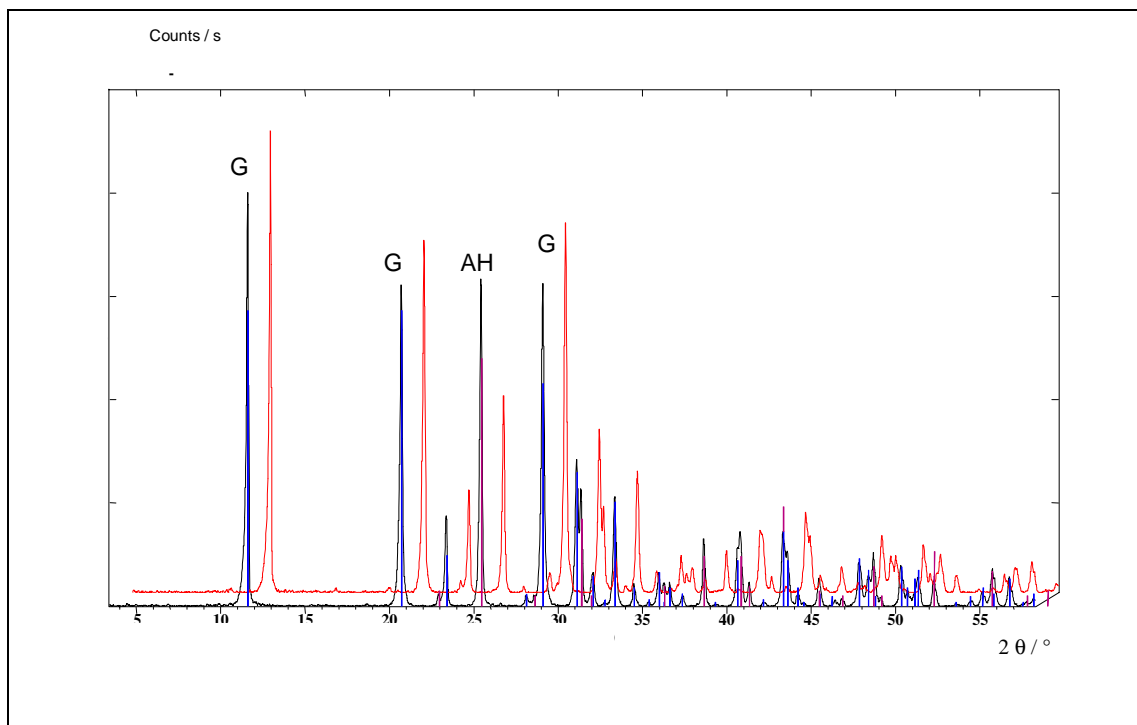
Es zeigt sich, daß die Abweichungen der modifizierten Mischungen (positiver oder negativer Art) bei allen Lagerungen deutlich geringer sind, als die der erhärteten Bindemittelpasten, die auf den reinen Calciumsulfatphasen beruhen. In fast allen Fällen zeigen die mit Kalk modifizierten Mischungen eine Zunahme des E-Moduls bei weiterer Lagerung. Das läßt sich durch eine Gefügeverdichtung aufgrund fortschreitender Hydratisierung bzw. Carbonatisierung der erhärteten Bindemittelpasten erklären.

Besonders deutlich ist der Rückgang des E-Moduls bei einer Beregnung mit anschließender Trocknung. Hier zeigt sich, daß Längenänderungen nicht immer mit der Entwicklung der E-Moduln korrelieren. Alle reinen erhärteten Gipspasten zeigten nach ca. 4 - 6 Zyklen Risse, die Längenänderungen dieser Proben waren jedoch gerade bei dieser Lagerung relativ gering. Die Risse führten bei einer weiteren Beregnung zur Zerstörung dieser Proben.

4.2.4 Änderungen der Phasenzusammensetzung

Exemplarisch wurde die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der erhärteten Bindemittelpasten bei unterschiedlicher Lagerung mittels Röntgenbeugungsanalyse untersucht. Zu beobachten war vor allem eine fortschreitende Hydratation noch vorhandenen Anhydrits bei andauernder Feucht- oder Wechsellagerung. Abbildung 23 zeigt dies beispielhaft anhand der Probe TA (Thermoanhydrit).

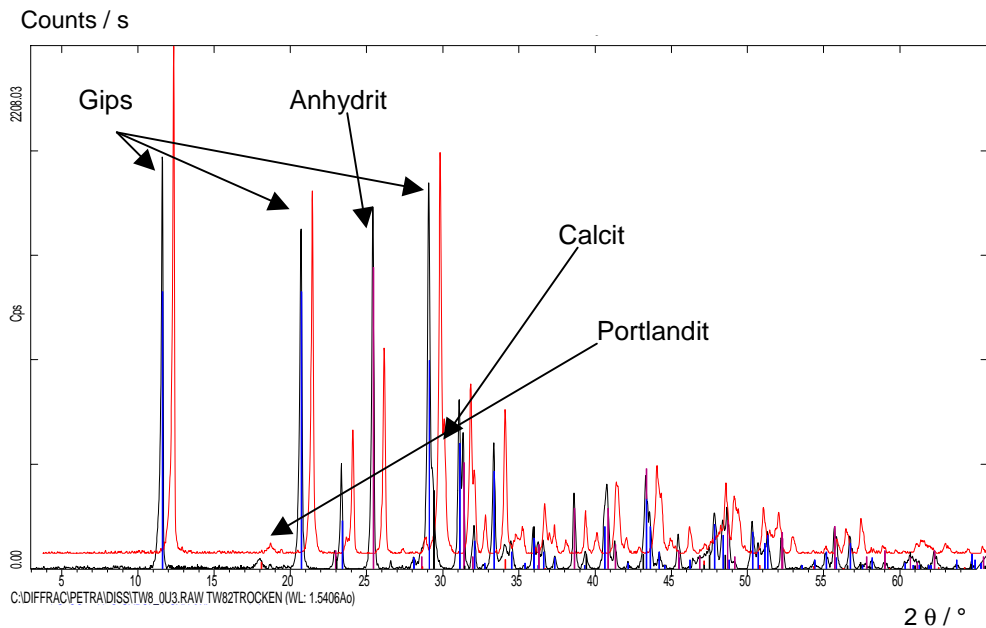
Abbildung 23: Röntgenbeugungsdiagramm der Probe TA nach 28-tägiger Lagerung bei 23/50 (blaue Linie) bzw. nach Methode III (ständige Wasseraufnahme – rote Linie)



Dargestellt sind die Röntgendiffraktogramme einer Probe nach 28-tägiger Lagerung bei ständiger Wasseraufnahme (Methode III, rote Kurve), sowie die einer gleich alten Probe, die trocken gelagert wurde (23/50, blaue Kurve). Ein Vergleich der Diffraktogramme zeigt eine Abnahme des Anhydrits (AH) bei gleichzeitiger Erhöhung des Gips-Gehaltes (G) bei ständiger Feuchtlagerung.

Diese nachträgliche Hydratation der erhärteten Bindemittelpasten läßt sich bei fast allen untersuchten Rezepturen feststellen. Bei den Bindemittelpasten, die mit Weißkalkhydrat modifiziert wurden, läßt sich bei feuchter Lagerung (Methode III, ständige Wasseraufnahme) zudem ein Fortschreiten der Carbonatisierung beobachten, wie die folgende Abbildung 24 am Beispiel der Mischung TA/CL 82 zeigt.

Abbildung 24: Röntgenbeugungsdiagramm der Probe TA/CL 82 nach 28-tägiger Lagerung bei 23/50 (blaue Kurve) bzw. nach Methode III (ständige Wasseraufnahme, rote Kurve)



Proben, die den Lagerungen III, Va und Vb unterzogen wurden, zeigten Ausblühungen. Auch hier waren bei der Lagerung III stärkere Effekte als bei den Wechsellagerungen erkennbar. Bei Untersuchung dieser Ausblühungen mittels Röntgendiffraktometer fanden sich in Abhängigkeit von den Mischungen verschiedene Substanzen (siehe Abbildung A 9 und Abbildung A 10). An den Verdunstungsflächen der Nullproben basierend auf Halbhydrat konnten die Minerale Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$), Syngenit ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) und Picromerit ($\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$) nachgewiesen werden. Diese in der Praxis häufig auftretenden Ausblühungen [STARK 96] entstehen hier aufgrund von Verunreinigungen des Bindemittels durch den Kapillartransport der Salzlösungen. Die Ausblühungen der Anhydrit-Mischungen bestehen im wesentlichen aus Syngenit (Abbildung A 10). Syngenit, ein Calcium-Kalium-Sulfat, entsteht wahrscheinlich durch die Zugabe von Kaliumsulfat als Anreger zum Frischmörtel [siehe Kapitel 5].

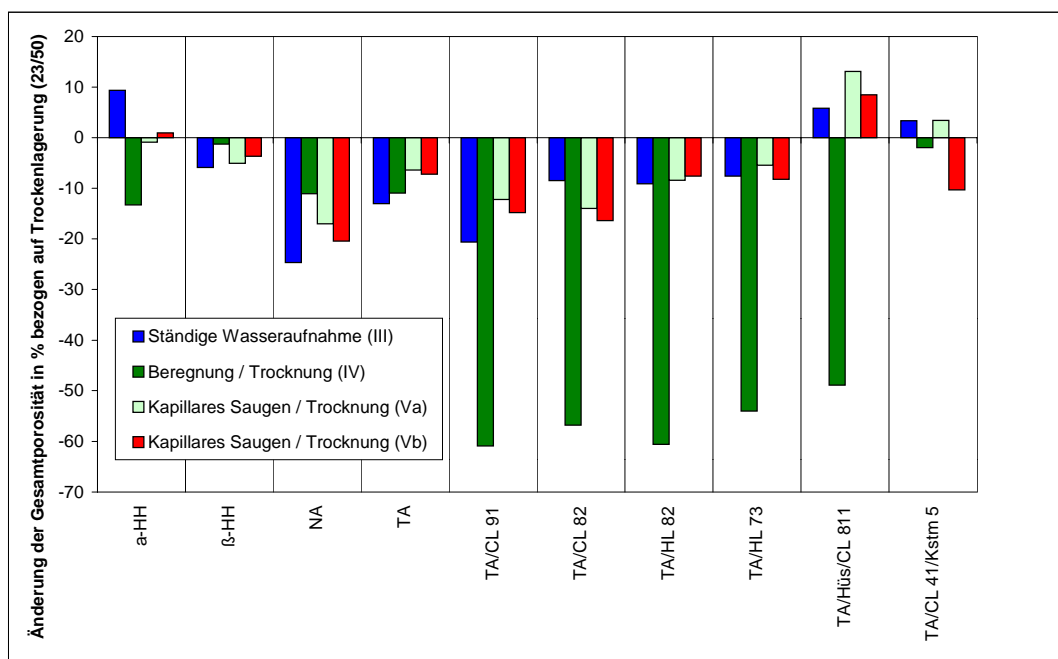
Bei den Mischungen, denen Kalk zugesetzt wurde, fand sich bei Untersuchung der Ausblühungen auch Calcit (Abbildung A 11).

4.2.5 Porenradienverteilung/Porosität

Ob es durch die unterschiedlichen Feucht- bzw. Wechsellagerungen zu Gefügeänderungen kommt, wie anhand der Ergebnisse aus der Messung des Quellen/Schwindens oder der E-Moduln zu erwarten war, wurde unter anderem mit Hilfe der Hg-Druckporosimetrie untersucht. Einerseits können Lösungsvorgänge eine erhöhte Porosität verursachen, andererseits sollten Umkristallisationen bzw. weitere Reaktionen während der Lagerung (Hydratation, Carbonatisierung) zu einer Verdichtung des Gefüges führen.

Nach 56-tägiger Feucht- bzw. Wechsellagerung wurde daher an den Proben der Methoden III bis V und an den Nullproben (trockene Lagerung bei 23/50) die Porosität und die Porenradienverteilung mittels Hg-Porosimetrie untersucht. Das folgende Diagramm zeigt die Änderung der Gesamtporosität bei Verwendung der Porosität der trocken gelagerten Proben als Bezugsgröße.

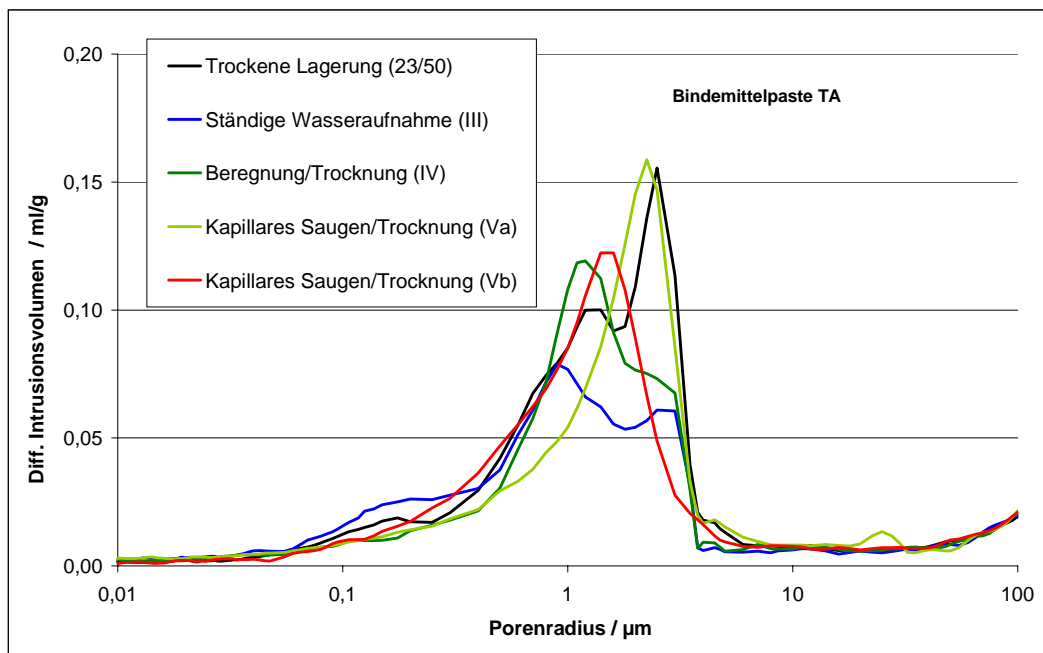
Abbildung 25: Einfluß der Art der Lagerung auf die Gesamtporosität (Hg-Porosimetrie) der erhärteten Bindemittelpasten bei Vergleich mit der trockenen Lagerung



Ein Vergleich der Lagerungen läßt nur Tendenzen erkennen. So ist die Porosität der Nullproben in nahezu allen Fällen höher als die Porosität der feucht gelagerten Proben. Die nachträglich eingebrachte Feuchte fördert bei den kalkhaltigen Bindemittelpasten die Carbonatisierung. Weiterhin kommt es zu einer Fortsetzung der Hydratation des noch vorhandenen Anhydrits bzw. der hydraulisch reagierenden Bestandteile. Beide Prozesse führen zu einem erneutem Kristallwachstum; Poren werden verfüllt, die Gesamtporosität sinkt.

Neben der Änderung der Gesamtporosität kann meist auch eine Änderung der Porenradienverteilung beobachtet werden. Die Maxima der Porenradienverteilung bzw. der mittlere Porenradius liegen bei den Feucht- und Wechsellagerungen in der Regel bei geringeren Werten (siehe Abbildung 26). Auch hier ist als Grund für diese Veränderungen ein Verfüllen der Poren mit Reaktionsprodukten sowie ggf. Rekristallisationsprozesse zu nennen [vgl. SINGH I]

Abbildung 26: Porenradienverteilung bei unterschiedlicher Lagerung (nach 56 d) am Beispiel der erhärteten Bindemittelpaste TA

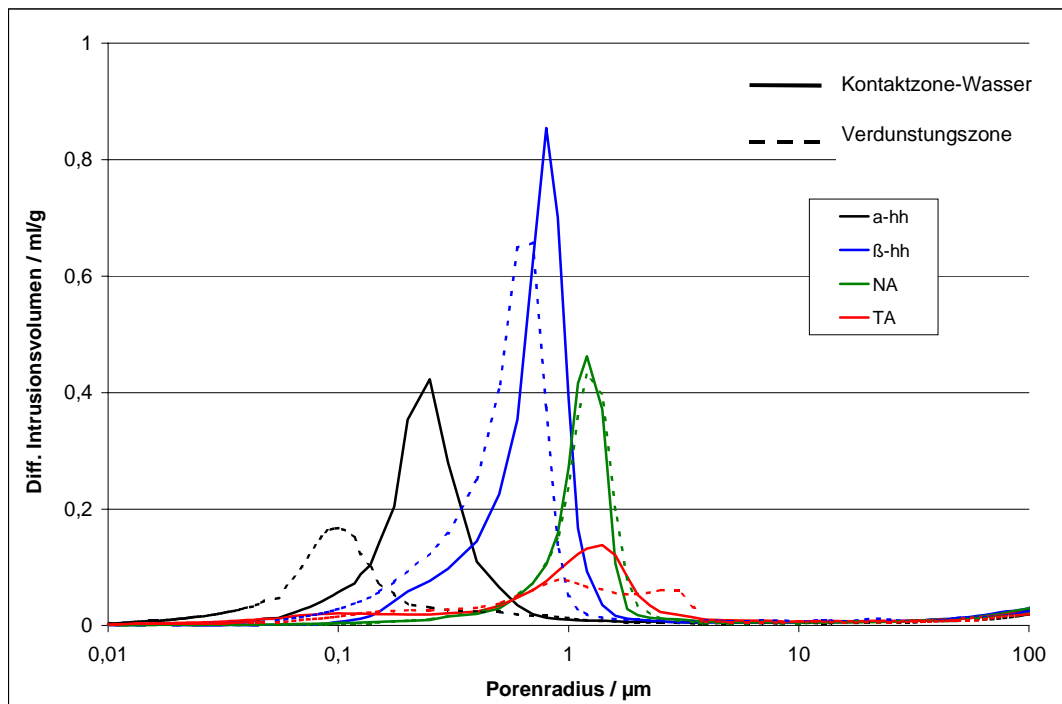


Trotz starker Lösungsvorgänge kommt es bei der Beregnung (Methode IV) wahrscheinlich aufgrund von Kristallisationsvorgängen im verbliebenen Material zu einer starken Verringerung der Porosität im Vergleich mit den Nullproben. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei den mit Kalk modifizierten Mischungen. Es kann davon ausgegangen werden, daß bei diesen Proben die Carbonatisierung durch die Feuchtlagerung noch unterstützt wurde und es dadurch zu einer Verdichtung des Gefüges kommt.

Lösungs- bzw. Hydratationsvorgänge sind bei den Wechsellagerungen Va und Vb aufgrund der absolut gesehen kürzeren Wassereexposition weniger weit fortgeschritten als bei einer konstanten Wasserlagerung (III). Auch hier treten nach einiger Zeit jedoch Veränderungen der oben genannten Kennwerte auf.

Daß Auflösung und erneute Kristallisation für diese Veränderungen verantwortlich sind, zeigt die folgende Abbildung 27 am Beispiel der reinen erhärteten Bindemittelpasten.

Abbildung 27: Porenradienverteilung der erhärteten Gipspasten nach 56-tägiger Lagerung III, untersucht an Material aus Kontakt- und Verdunstungszone



Bei fast allen erhärteten Gipspasten kommt es in der Verdunstungszone im Vergleich zur Kontaktzone mit Wasser zu einer Verringerung der Gesamtporosität, sowie zu einer Verschiebung des Maximums der Porenradienverteilung hin zu geringeren Werten.

4.2.6 Rasterelektronenmikroskopie

Eine mögliche Änderung des Gefüges aufgrund einer andauernden Bewitterung wurde auch mikroskopisch untersucht. Exemplarisch wurden einige Proben nach der Bewitterung (Prüfmethoden II-V) sowie nach der trockenen Referenzlagerung (23/50) unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet.

Hinweise für eine Verdichtung des Gefüges aufgrund neuer Kristallbildungen lassen sich nur vereinzelt beobachten (Bildung feiner Gipsnadeln bei den Feuchtlagerungen, Abbildung 28).

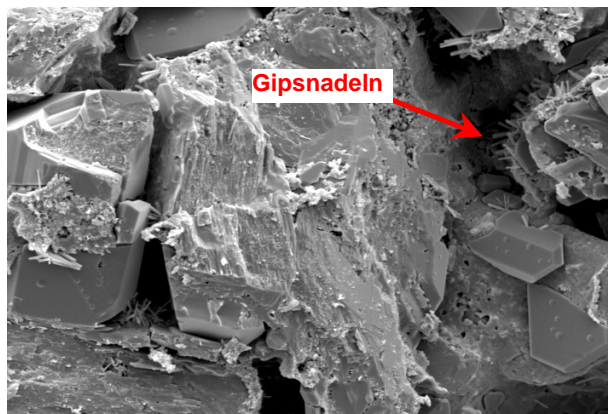


Abbildung 28:

REM-Aufnahme der erhärteten Bindemittelpaste mit 10 M.-% Weißkalkhydrat bei Lagerung nach Methode III (ständige Wasseraufnahme) – Neubildung feiner Gipskristalle

Deutlich sichtbar sind unter dem REM jedoch die Schäden, welche durch Lösungserscheinungen verursacht werden (Abbildung 29).

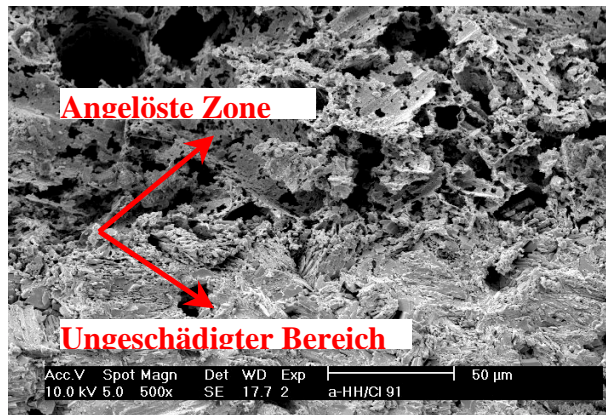


Abbildung 29:

REM-Aufnahme einer mit Kalk modifizierten erhärteten Bindemittelpaste auf Basis von α -HH nach Lagerung II

Auch bei den im Labor nachgestellten Bewitterungsversuchen konnten an den Proben „Lösungsrinnen“ mit gerichteten, teilweise stark abgerundeten Kristallen mittels REM nachgewiesen werden. Solche Lösungsrinnen wurden auch an historischem Probenmaterial gefunden (siehe 3.4.2, Abbildung 15). Die folgende Abbildung zeigt solche Lösungserscheinungen am Beispiel der Probe aus α -Halbhydrat.

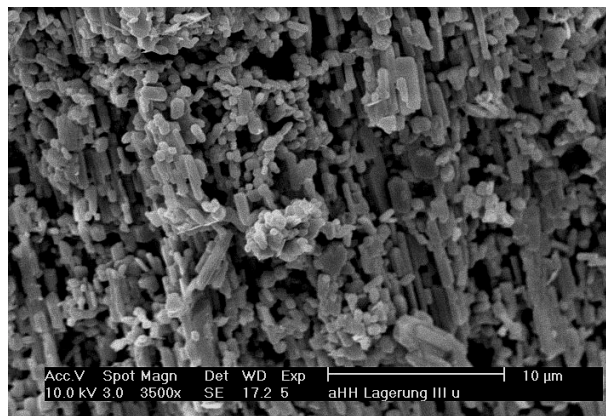


Abbildung 30:

REM-Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus α -HH nach Lagerung III, gerichtete Kristallausbildung

Die Erhöhung der Wasserresistenz der modifizierten Mörtel beruht auf folgenden Ursachen: Zum einen kommt es zu einer Gefügevergrößerung im Vergleich zum reinen Gipsmörtel und damit zu einer Verringerung der Oberfläche. Zusätzlich wird ein Kalkgerüst um die Gipskristalle gebildet, welches auch dann noch bestehenbleibt, wenn der Gips bereits vollständig gelöst ist (siehe auch Kapitel 5.4).

4.3 Praxisversuche

Der Entwicklung und Untersuchung wasserresistenter Gipsmörtel im Labor sollten sich weitere Versuche unter praxisrelevanten Bedingungen anschließen. Möglicherweise auftretende

Schadensmechanismen der Gipsmörtel im Mauerwerksverbund sowie deren Verarbeitbarkeit sollten überprüft werden. Um die Beständigkeit solcher Gipsmörtel im Vergleich mit einem herkömmlichen Baugips bzw. im Vergleich mit einem Kalkmörtel langfristig zu beobachten, wurden daher „Mustermauern“ mit diesen Mörteln angelegt.

4.3.1 Anlegen der Musterflächen

Die Anlage dieser Musterflächen erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Prüftechnik IFEP GmbH, Osnabrück. Einige der in Kapitel 5.4 beschriebenen Bindemittel-Mischungen wurden mit Kalksteinmehl im Verhältnis 1:1 gemagert und untersucht: 80 % TA / 20 % CL 80, 80 % TA / 20 % HL 2 und 80 % TA / 10 % Hüs / 10 % CL 80.

Das Material wurde als Mauermörtel in kleinen Ziegelmauern eingesetzt. Nach Ihrer Fertigstellung wurden diese Ziegelmauern unterschiedlichen Bewitterungen ausgesetzt.

Alle Mörtelsysteme wurden als fertige Trockenmörtel eingesetzt und durch entsprechende Wasserzugabe auf eine verarbeitungsgerechte Konsistenz eingestellt.

Eine Aufstellung der ermittelten Frischmörtelkennwerte findet sich im Anhang (Tabelle A 7).

Mit den so hergestellten Frischmörteln wurden die Ziegel vollfugig vermauert. Die Ziegel weisen im Mittel laut Prüfzeugnis Festigkeiten von 18,2 N/mm², eine Wasseraufnahme von 9,7 %, sowie eine Rohdichte von ca. 1,89 kg/dm³ auf. Die Eigenschaften der Ziegel entsprachen damit im Mittel den Kenndaten historischer Ziegel [vgl. FREYBURG].

Zur Ermittlung der Festmörtelkenndaten, wie z.B. dynamischem E-Modul und Festigkeiten (Biegezug-, Druckfestigkeit) wurden weitere Prüfkörper (Normprismen, Abmessung: 16 cm x 4 cm x 4 cm) angefertigt, die bis zum 28. Tag im Klima 23/50 gelagert wurden.

Die fertiggestellten Ziegelmauern wurden zunächst 14 Tage in einer Halle bei Temperaturen von ca. 18° C gelagert. Eine Schädigung der Ziegelmauern bzw. eine Schädigung der noch frischen Mörtel durch Wettereinflüsse wie z.B. Frost oder Regen sollte so vermieden werden.

Anschließend erfolgte folgende Lagerung:

Lagerung a: **Ziegelmauern überdacht**, Temperaturschwankungen möglich, aber keine direkte Beregnung bzw. Kontakt mit entsprechendem Niederschlag

Lagerung b: **Ziegelmauern völlig frei stehend**, ungehinderte Bewitterung
(Als Schutz vor einer Durchnässung des Mauerwerks von oben wurde auf der obersten Ziegellage Dachpappe etwa in Ziegelbreite angebracht)

4.3.2 Beurteilung nach einjähriger Standzeit

Eine Begutachtung der oben beschriebenen Ziegelmauern fand im vierteljährlichen Turnus bis zu einer Standzeit von einem Jahr statt. Zu diesen Zeitpunkten wurden die Mauern optisch begutachtet; an den vergleichbar gelagerten und zum gleichen Zeitpunkt hergestellten Normprismen wurde der dyn. E-Modul gemessen.

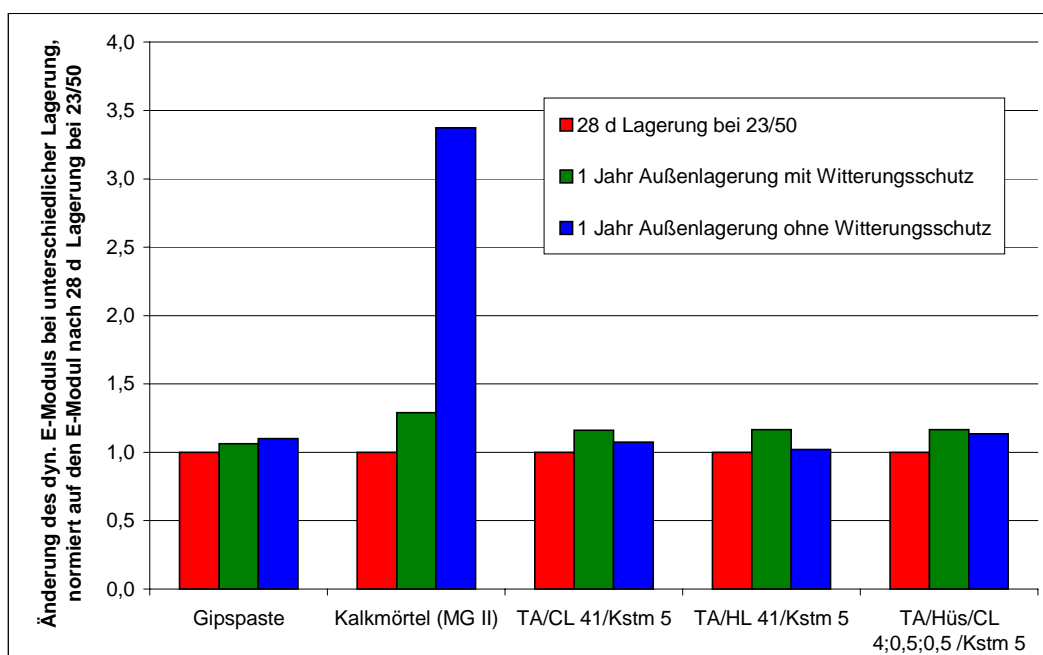
Bei keinem der Mörtel waren Flankenabrissse oder Risse im Mörtel selbst zu beobachten. Leichte Ausblühungen konnten auf den Ziegeln beobachtet werden, die mit den modifizierten Mischungen gemauert wurden, ließen sich aber ohne Probleme abbürsten. Eine Analyse dieser Ausblühungen ergab, daß es sich dabei um Gips handelte.

Während die überdachten Versuchsmauern keinerlei Schäden zeigten, konnten an den völlig frei stehenden Mauern beginnende Lösungserscheinungen beobachtet werden – jedoch nur in sehr geringem Ausmaß. Alle Gipsmörtel zeigten vorwiegend an dem rückseitig befindlichen, nicht durch einen Fugenglattstrich verdichteten überstehendem Mörtel leichte Lösungserscheinungen (waschbetonartige Strukturen), beim reinen Stuckgips waren bereits rinnenartige Vertiefungen durch Lösungserscheinungen zu erkennen.

Die Entwicklung der E-Moduln der eingesetzten Mörtel wurde anhand von Normprismen ermittelt, die zusammen mit den Probemauern hergestellt und identisch gelagert wurden.

Die Änderung der Kennwerte der unterschiedlich gelagerten, ein Jahr alten Prüfkörper im Vergleich mit den Probekörpern nach 28 d zeigt die folgende Abbildung 31.

Abbildung 31: Änderung des dyn. E-Moduls der Probekörper nach einjähriger Außenlagerung, bezogen auf den Wert nach 28-tägiger Lagerung bei 23/50



Die Außenlagerung der Probekörper verursacht bei allen Mischungen eine Erhöhung der E-Moduln, die in der Regel bei den überdachten Proben etwas höher ist als bei den völlig frei lagernden. Der hohe Wert, der an den frei bewitterten Kalkmörtel-Proben gemessen wurde, läßt sich vorwiegend auf die fortschreitende Carbonatisierung zurückführen, die durch höhere Feuchte begünstigt wird.

Mit dem Praxisversuch konnte gezeigt werden, daß bei einer Freiland-Bewitterung der Mörtel im Mauerwerk vergleichbare Prozesse ablaufen, wie sie in den Laborversuchen an den reinen Mörteln durch unterschiedliche Feucht- und Wechsellagerungen nachgestellt wurden.

4.4 Fazit

Wechselnde oder ständige Feuchte kann in der Praxis zu Schäden an Gipsmörteln aufgrund der folgenden Mechanismen führen:

- Auflösung des Gipses und Abtransport des gelösten Materials (z.B. durch Schlagregen)
- Prozesse der Umkristallisation, d.h. Lösung und erneute Kristallisation des gelösten Materials (z.B. durch aufsteigende Feuchte)

Diese Mechanismen konnten auch bei der Untersuchung der Wasserresistenz an ausgewählten Proben im Labor beobachtet werden, d.h. diese Methoden sind grundsätzlich geeignet um die Beständigkeit von Gipsmörteln zu prüfen.

Lösungsschäden wurden vornehmlich durch die Verfahren I (Lösungsversuch), II (fließendes Wasser) und IV (Beregnung/Trocknung) gefördert, Prozesse der Umkristallisation konnten bei den Lagerungen III (Kap. Saugen) und V (Kap. Saugen/Trocknung) beobachtet werden. Die Effekte waren dabei um so deutlicher, je größer die absolut aufgenommene Menge Wasser war.

Als besonders geeignet für die Untersuchung der Wasserresistenz erscheinen daher die Verfahren II, III und IV. Sie stellen die in der Praxis auftretenden Schadensmechanismen in geeigneter Weise nach und erlauben bei vergleichbaren Ergebnissen eine schnellere Beurteilung der Mörtel (aufgrund eines gewissen Zeitraffereffektes) als die ebenfalls getesteten Verfahren I und V.

Eine Dokumentation der Schäden kann durch die Messung der Längenänderungen, des dyn. E-Moduls, der Massenänderungen, sowie anhand einer optischen Begutachtung erfolgen. Als ergänzende Methoden sind die Hg-Druck-Porosimetrie und die Mikroskopie empfehlenswert.

Die Praxisversuche haben weiterhin bestätigt, daß die Exposition der Gipsmörtel am Bauwerk und damit verbunden - der Grad der Durchfeuchtung, eine große Rolle bei der Entstehung von

Schäden spielt. An keinem der Mörtel konnten bei der Außenlagerung mit Witterungsschutz (Überdachung) Schäden beobachtet werden.

Wurden die Musterflächen der Witterung voll ausgesetzt, so waren vorwiegend Lösungsschäden zu beobachten. Änderungen des dyn. E-Moduls (an gleich gelagerten Prismen), die auf gefügestörende Treibreaktionen hinweisen könnten, wurden nicht festgestellt. Diese Tendenzen entsprechen denen, die auch im Rahmen der Laborversuche beobachtet werden konnten.

5 Entwicklung von Gipsmörteln für den Außenbereich

Die Verwendung von Gipsmörteln im Außenbereich setzt voraus, daß diese eine ausreichende Witterungsbeständigkeit aufweisen. Gewährleistet wird diese u.a. durch eine ausreichend hohe Wasserresistenz, aber auch andere Festmörteleigenschaften, wie z.B. das hygrische Verhalten (Wasseraufnahme, Wasserabgabe, μ -Wert, Längenänderungen) bzw. technologische Eigenschaften (E-Modul, Festigkeiten) müssen hinsichtlich der weiteren Verwendung (z.B. Mauer- oder Putzmörtel) optimiert werden.

Frischmörteleigenschaften spielen im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit des Mörtels eine Rolle.

Gipsmörtel, die im Außenbereich zur Sanierung von Bauwerken als Ersatz für entsprechende historische Mörtel verwendet werden sollen, sollten daher etwa folgende Eigenschaftskennwerte aufweisen:

- hohe Wasserresistenz (Masseverlust < 20 %, bestimmt nach Methode II)
- Druckfestigkeit 10 - 20 N/mm²
- Dyn. E-Modul ~ 10 kN/mm², oder kleiner
- Quellen/Schwinden $\leq \pm 0,15$ mm/m
- Verträglichkeit mit dem Altmaterial

Die Festlegung dieses Anforderungsprofils erfolgte auf der Grundlage der Ergebnisse, die im Rahmen der Untersuchung historischer Gipsmörtel von verschiedenen Autoren gemacht wurden [LUCAS, MIDDENDORF etc.].

Im konkreten Anwendungsfall muß ggf. eine objektbezogene Korrektur einzelner Kennwerte erfolgen. So wurde z.B. durch die in Kap. 3 beschriebenen Untersuchungen festgestellt, daß der dyn. E-Modul historischer Gipsmörtel bei entsprechenden Festigkeiten teilweise deutlich höher sein kann, als die im Anforderungsprofil genannten 10 kN/mm².

Wie bereits in Kapitel 1.3.3 beschrieben, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Wasserlöslichkeit von Gipsbaustoffen zu reduzieren:

- Änderung der Kristallmorphologie hin zu „größeren“ Kristallen (Verkleinerung der spez. Oberfläche der Kristalle), um eine Verkleinerung der „Angriffsfläche“ zu erzielen
- Verdichtung des Gefüges durch Einsatz solcher Bindemittel oder Zusatzstoffe, die feinkristalline Hydratationsprodukte bilden und so Poren „verfüllen“

- Reduktion der löslichen Bestandteile des Mörtels durch Einsatz solcher Bindemittel oder Zusatzstoffe, die „wasserunlösliche“ Reaktionsprodukte bilden

Diesen Möglichkeiten wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nachgegangen.

Die Wirkung organischer Säuren, wie Citronensäure oder Weinsäure, auf den Habitus der entstehenden Gipskristalle wurde in der Literatur bereits mehrfach nachgewiesen [FORG, MALLON, BENZ etc.]. Eine gezielte Einflußnahme auf die Kristallmorphologie, z.B. durch den Einsatz weiterer Zusatzmittel, ist demnach generell möglich. Die Wirkung synthetischer organischer Stoffe (z.B. Silicone) wurde nicht untersucht, da diese im denkampflegerischen Bereich in der Regel nicht eingesetzt werden dürfen.

Um eine Verbesserung der Wasserresistenz zu erreichen, wurden daher zwei Wege beschritten: Zum einen erfolgte der Einsatz von Zusatzmitteln, zum anderen die Kombination reiner Calciumsulfat-Bindemittel mit anderen Zusatzstoffen, um so eine Verdichtung des Gefüges zu erreichen bzw. den löslichen Anteil des Baustoffs zu reduzieren.

Nach einer Optimierung der Bindemittelgemische wurde in weiteren Versuchsreihen der Einfluß des Zuschlags auf die Wasserresistenz untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im folgenden dargestellt.

5.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Folgende Ausgangsstoffe kamen zum Einsatz:

5.1.1 Bindemittel auf Calciumsulfatbasis

Als Ausgangsstoffe für die Herstellung der Mörtelmischungen kamen folgende technische Produkte zum Einsatz: alpha-Halbhydrat (α -HH), beta-Halbhydrat (β -HH), Thermoanhydrit (REA-Anhydrit) (TA), sowie Naturanhydrit (NA). Diese Ausgangsstoffe unterscheiden sich in ihren Eigenschaften und werden aufgrunddessen in der Praxis auch unterschiedlich eingesetzt (β -HH: Stuckips, TA, α -HH: Estrich).

Unterschiede im Herstellungsverfahren, ein trockenes Brennverfahren bei Temperaturen zwischen 120 – 180 °C beim β -Halbhydrat bzw. ein nasses Brennverfahren im Autoklaven beim α -Halbhydrat, sind die Ursache für die unterschiedlichen Eigenschaften der Halhydrate, die sich z.B. im unterschiedlichen Kristallhabitus zeigen. Während α -HH in der Regel verhältnismäßig gut ausgebildete Kristalle mit vorwiegend prismatischen Formen aufweist,

läßt der Mangel an scharfen Begrenzungsflächen und Kanten beim β -HH auf Störungen im Kristallgitter schließen [KRÖNERT 72, WIRSCHING].

Die großen, gewachsenen Primärteilchen des Naturanhydrits lassen sich nur durch Feinstmahlung in einen reaktionsfähigen Zustand bringen. Zusätzlich sind Anreger nötig um ein Abbinden zu erreichen. Als Verunreinigungen sind häufig Kalkstein, Dolomit oder Tonmergel enthalten [WIRSCHING].

Bei der Herstellung von Thermoanhydrit, oder auch REA-Anhydrit (Ausgangsstoff: Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen) entstehen neben Anhydrit II noch geringe Mengen an Anhydrit III und Halbhydrat [SCHOLZE, WIRSCHING].

5.1.2 Kalke

Es wurden Kalke unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung verwendet. Nach DIN 1060 werden Kalke nach ihrem (CaO+MgO)-Gehalt, oder, bei hydraulischen Kalken, nach ihrer Druckfestigkeit eingeteilt: Während Luftkalke eine carbonatische Erhärtung zeigen, reagieren die Calciumsilikate und -aluminat, die in den hydraulischen Kalken enthalten sind, unter Bildung entsprechender Hydratphasen.

Als Luftkalke wurden ein CL 90 sowie ein CL 80 eingesetzt. Als hydraulischer Kalk kam ein NHL 2, d.h. ein natürlicher HL 2 zur Anwendung.

5.1.3 Zemente

Als Zemente wurden ein Weißzement sowie ein CEM III/B 42,5 R - HS eingesetzt.

Weißzemente sind Portlandzemente aus eisen- und manganfreien bzw. -armen Rohstoffen. Calciumaluminatferrat-Phasen sind daher nicht enthalten. Bezüglich der technologischen Eigenschaften ist ein Weißzement jedoch vergleichbar mit einem herkömmlichen Portlandzement.

Als HS-Zemente bezeichnet man hochsulfat-widerstandsfähige Zemente. Die Gehalte an C_3A bzw. Al_2O_3 liegen bei diesen Zementen unter 3 % bzw. 5 %. Ein schädigendes Ettringitreiben kann dadurch verhindert werden.

5.1.4 Weitere Zusatzstoffe

Hüttensand wurde als latent hydraulischer Zusatzstoff eingesetzt. Bei Feinstmahlung reagiert diese glasartig erstarrte Hochofenschlacke durch Anregung mit Erdalkali- bzw. Alkaliverbindungen, z.B. Calcium- oder Natriumhydroxid unter hydraulischer Erhärtung.

Microsilica wird zu den künstlichen Puzzolanen gezählt und besteht zum großen Teil aus amorphen Siliciumoxid. In Verbindung mit Calciumhydroxid kann auch das Microsilica zu gelartigen CSH-Phasen reagieren [LINDER].

Als Füller wurde inertes Kalksteinmehl eingesetzt.

5.1.5 Zuschlag

Anhydritstein, Gipsstein und Kalkstein wurden als Zuschlag eingesetzt. Anhydrit- und Gipsstein wurden in einer Korngröße von ca. 60 mm geliefert. Der Kalksteinbrechsand wurde nach Kornklassen sortiert geliefert. Alle Zuschläge wurden auf eine geeignete Sieblinie eingestellt (siehe Kapitel 5.5).

5.1.6 Zusatzmittel

Es wurden folgende Zusatzmittel als p.A.-Substanzen eingesetzt (Ausnahme: Trockenblut):

Organische Säuren/Salze: L(+)-Weinsäure, Citronensäure, Ca-Acetat, KNa-Citrat

Eiweißstoffe: Kollagen, Säurecasein, Lactalbumin, Trockenblut

Anreger: Kaliumsulfat, Calciumsulfat-Dihydrat

Entsprechende Kennwerte der verwendeten Ausgangsstoffe (Korngrößenverteilung, spez. Oberfläche etc., vgl. Kap. 2.1) finden sich im Anhang (Tabelle A 6).

5.2 Bindemittelpasten der reinen Calciumsulfate

Ausgangspunkt für die Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel war zunächst die Untersuchung von Bindemittelpasten, beruhend auf den reinen Calciumsulfat-Phasen. Es wurden die in Kapitel 5.1.1 beschriebenen techn. Calciumsulfate/-sulfat-hydrate eingesetzt.

Den Proben auf Anhydritbasis wurde 0,6 M.-% Kaliumsulfat als Anreger zugesetzt. α - und β -HH wurden ohne weitere Zusätze verarbeitet.

Die Herstellung erfolgte, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, auf ein Ausbreitmaß von $16,5 \pm 0,5$ cm.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im folgenden geschildert.

5.2.1 Frisch- und Festmörtelkennwerte

Unterschiede im Reaktionsverhalten der Halbhydrate und Anhydrite spiegeln sich in den Kennwerten wieder, die in Tabelle 5 zusammengestellt sind.

Unterschiedliche Mahlfeinheiten (siehe Tabelle A 6) sind u.a. verantwortlich für den unterschiedlich hohen Wasserbedarf der Bindemittel. Das beeinflusst auch die weiteren Kennwerte. Bei Untersuchungen der Nullproben zeigen Thermoanhydrit und α -Halbhydrat die größten Wasserresistenzen (Masseverlust 51 % bzw. 66 %, siehe Tabelle 5). Eine Kombination dieser beiden Bindemittel hat eine Erniedrigung der Wasserresistenz und der Festigkeiten zur Folge (siehe Tabelle A 8 im Anhang).

Tabelle 5: Ausgewählte Frisch- und Festmörtelkennwerte reiner Gipspasten

	$\beta_{Bz} - 28 \text{ d}$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28 \text{ d}$ [N/mm ²]	$E_{Dyn} - 28 \text{ d}$ [kN/mm ²]
α-HH	18,0	68,3	33,9
β-HH	8,3	32,3	12,6
NA	2,3	7,2	7,7
TA	12,9	60,5	27,1
	W/B-Wert [-]	VB [min]	Masseverlust ¹⁾ [%]
α-HH	0,24	10	66,0
β-HH	0,43	13	79,0
NA	0,23	25	100,0
TA	0,28	70	51,0

1) bestimmt nach Methode II, vgl. Kapitel 2.5

Halbhydrate sind metastabil und damit reaktionsfreudiger als Anhydrit, welcher erst bei Zugabe geeigneter Anreger zum Gips reagiert. Anreger erhöhen die Löslichkeit des Anhydrits und beschleunigen damit diese Reaktion [OTTEMANN]. Während die Halbhydrate nahezu vollständig zum Calciumsulfat-Dihydrat umgesetzt werden, liegen die Rehydratationsgrade des Anhydrits in der Regel „nur“ bei 50 % – 90 %, je nach Ausgangsstoff und Anreger [HAJJOUJI]. Bestätigt wird dies durch das Versteifungsverhalten (VB=Versteifungsbeginn) der einzelnen Phasen.

Das Quellen/Schwinden der Gipspasten wurde bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Deutliche Längenänderungen sind demnach nur bei andauernder Feuchtlagerung zu erwarten.

5.2.2 Gefügeausbildung

Die unterschiedliche Reaktivität der Calciumsulfat-Phasen beeinflusst die Kristallausbildung der erhärteten Gipspasten. Bei den Halbhydraten entstehen längliche, stark verzahnte Gipskristalle (Abbildung 32, Abbildung 33). Die Hydratation des Anhydrits verläuft deutlich langsamer. Es werden daher große, gut ausgebildete, derb prismatische Kristalle gebildet (Abbildung 34, Abbildung 35).

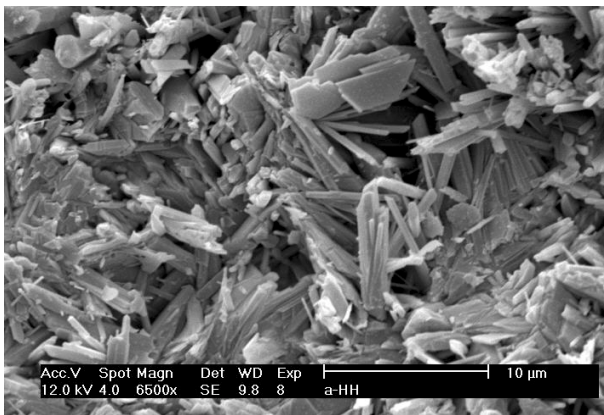


Abbildung 32:
Kristallausbildung einer erhärteten Bindemittelpaste aus α -HH, stark verzahnte Gipsnadeln

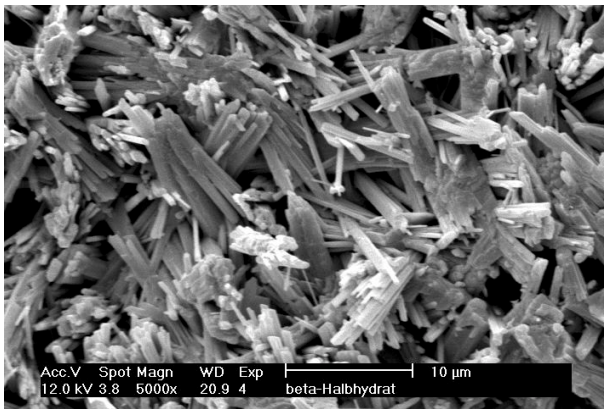


Abbildung 33:
Kristallausbildung einer erhärteten Bindemittelpaste aus β -HH, nadelige Gipskristalle

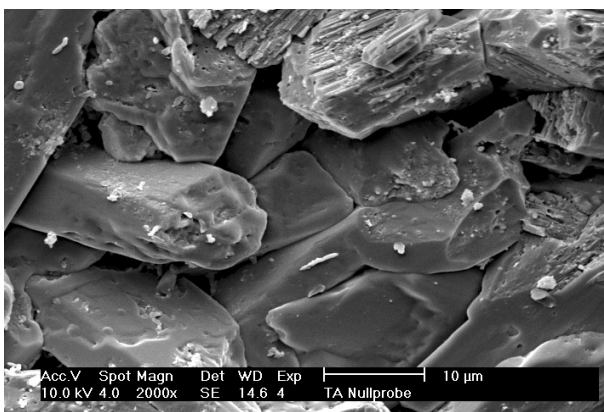


Abbildung 34:
Kristallausbildung einer erhärteten Bindemittelpaste aus TA, derb-prismatische, deutlich vergrößerte Gipskristalle, Anreger: K_2SO_4

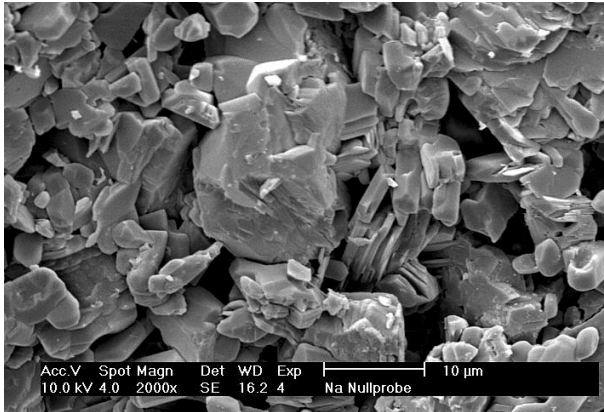


Abbildung 35:
Kristallausbildung einer erhärteten
Bindemittelpaste aus NA, Anreger: K_2SO_4

5.2.3 Fazit

Bindemittelgemische beruhend auf den reinen Calciumsulfatphasen sind aufgrund der hohen Festigkeiten und des hohen Materialverlustes bei Wasserbeanspruchung nicht ohne eine weitere Modifizierung als Ausgangsstoff für Gipsmörtel im Außenbereich einsetzbar.

Von den untersuchten Bindemitteln ist besonders Thermoanhydrit für die Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel geeignet. Die entstehenden derb prismatischen Kristalle sind bei einem lösenden Angriff aufgrund der entsprechend kleineren spezifischen Oberfläche widerstandsfähiger als z.B. beim β -HH. Durch den im Vergleich zu den Halbhydraten allgemein geringeren Hydratationsgrad [ISRAEL, OTTEMANN] besteht die Möglichkeit einer verspäteten Hydratation. Dies kann zum einen zu Längenänderungen führen, zum anderen können aber auch Risse und Poren verfüllt werden. Mörtel auf Basis von Anhydrit bieten also ein gewisses Potential zur „Selbsteilung“. Historische Gipsmörtel wurden vorwiegend durch Hochbrand hergestellt und enthielten ebenfalls Anhydrit in großen Anteilen [LUCAS 92, vgl. Kapitel 3.2].

Eine Änderung des Kristallhabitus und die damit verbundene Änderung weiterer Eigenschaften ist besonders bei den Bindemittelgemischen auf Basis von Halbhydrat zu untersuchen.

5.3 Einfluß von Zusatzmitteln

Eine Möglichkeit, Gipsmörtel bezüglich der Dauerhaftigkeit zu verbessern, liegt in der gezielten Zugabe von Zusatzmitteln. Es ist bekannt, daß organische Säuren wie z.B. Wein-, Citronen- oder Essigsäure eine verzögernde Wirkung besitzen [FORG, MALLON]. Diese verzögernde Wirkung, die auf der Bildung wachstumshemmender Komplexe beruht [SCHMIDT], bewirkt eine Vergrößerung der Kristalle. Mit wachsender Kristallgröße nimmt die spezifische Kristalloberfläche ab, d.h. die Wasserresistenz sollte sich erhöhen. Aus diesem

Grund wurden in Vorversuchen Bindemittelpasten auf Basis von β -Halbhydrat und organischen Säuren/Salzen bzw. Proteinen untersucht.

5.3.1 Einfluß organischer Säuren/Salze

Weinsäure (Ws), Citronensäure (Cs), Citrat (Ct) und Acetat (Ac) wurden in Mengen von 0,1 M.-%, bezogen auf β -Halbhydrat, im Anmachwasser gelöst. Die Bindemittelpasten wurden auf ein Ausbreitmaß von $16,5 \pm 0,5$ cm eingestellt. Bestimmt wurden Festigkeiten und E-Moduln nach 28 d, sowie der Masseverlust der Prismen nach Lagerung in der Wasserrinne (Verfahren II, Kap. 2.3.5.1).

Die Ergebnisse dieser Vorversuche zeigt Tabelle A 9 im Anhang.

Wie in der Literatur beschrieben [FORG, MALLON, BENZ], wirken alle vier Zusatzstoffe als Verzögerer. Dabei ist die verzögernde Wirkung abhängig vom pH-Wert [MALLON]. Während Weinsäure und ihre Salze ihre volle Verzögerungswirkung erst bei pH-Werten größer als 11 erreichen, erbringen Citronensäure und Citrate bereits ein Wirkungsoptimum im neutralen und schwach alkalischen Bereich.

Mischungen, denen Weinsäure oder Acetat zugegeben wurde, weisen daher nur leicht vergrößerte Kristalle auf und besitzen ähnlich hohe Festigkeiten und E-Moduln wie Gipsmörtel aus reinem β -Halbhydrat (Abbildung 36 und Abbildung 37).

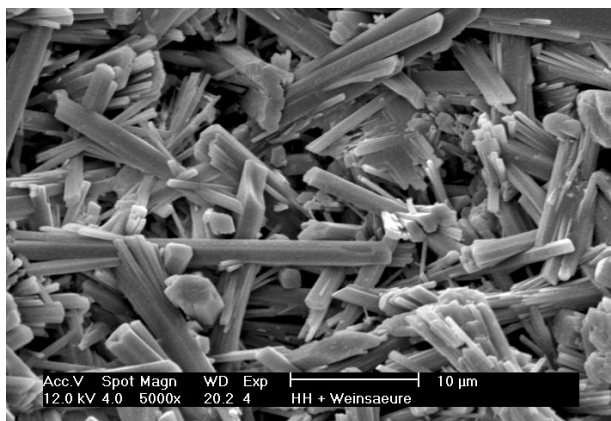


Abbildung 36 :

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus β -HH bei Zugabe von Weinsäure

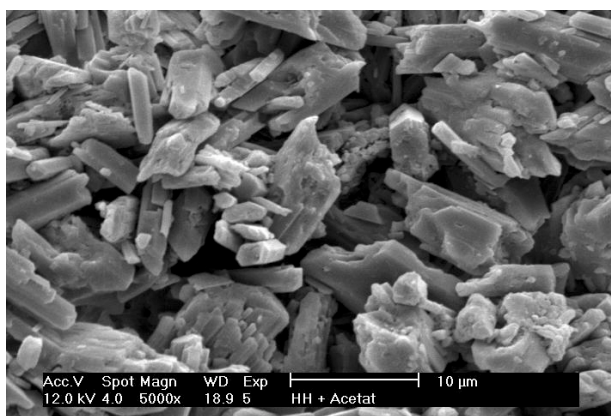


Abbildung 37:

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus β -HH bei Zugabe von NaK-Acetat

Gipspasten mit Zusatz von Citronensäure bzw Citrat mit deutlich größeren Kristallen (Abbildung 38 und Abbildung 39) haben entsprechend niedrigere Festigkeiten und E-Moduln (vgl. auch Tabelle A 9).



Abbildung 38 :
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus β -HH bei Zugabe von Citronensäure

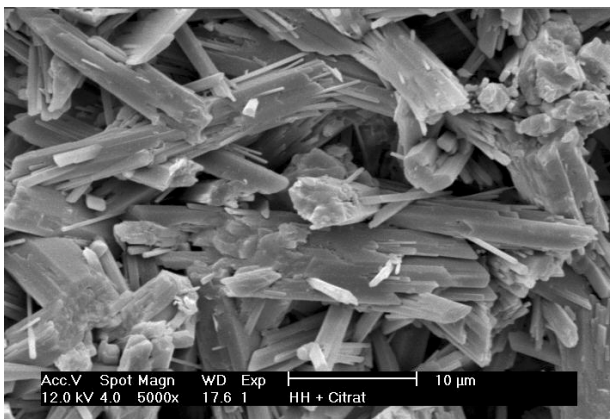


Abbildung 39:
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus β -HH bei Zugabe von Citrat

Diese Kristallvergrößerung hat jedoch bei allen eingesetzten Säuren bzw. Salzen nur einen geringen Einfluß auf die Wasserresistenz (13 – 27 M.-% Masseverlust, Tabelle A 9). Frühere Untersuchungen haben dies bereits für Rezepturen aus β -HH, Weinsäure und Citronensäure nachgewiesen [vgl. MIDDENDORF].

5.3.2 Einsatz von Eiweißstoffen

Frühere Untersuchungen an Kalkmörteln zeigten, daß die Zugabe von Eiweißstoffen einen durchaus positiven Einfluß auf deren Eigenschaften hatte [BOENKENDORF]. So wurde festgestellt, daß die Wasseraufnahme der Mörtel bei Zugabe von 0,5 M.-% Eiweiß stark zurückging, diese Mörtel sich nahezu hydrophob verhielten.

In Vorversuchen wurden Kollagen (Kg), Kasein (Ks), Lactalbumin (La), sowie Trockenblut (Tb) in Mengen von 0,5 M.-% bezogen auf β -Halbhydrat im Anmachwasser gelöst. Die Herstellung erfolgte wie in Kap. 2.2.1 beschrieben. Alle Mischungen wurden auf ein Ausbreitmaß von $16,5 \pm 0,5$ cm eingestellt.

Tabelle 6 zeigt die Festigkeiten und E-Moduln, den Wasser/Trockenmörtel-Wert, (W/T) den Versteifungsbeginn, sowie den Masseverlust nach Lagerung in fließendem Wasser.

Tabelle 6: Ausgewählte Kennwerte der mit Proteinen modifizierter Gipspasten auf Basis von β -HH

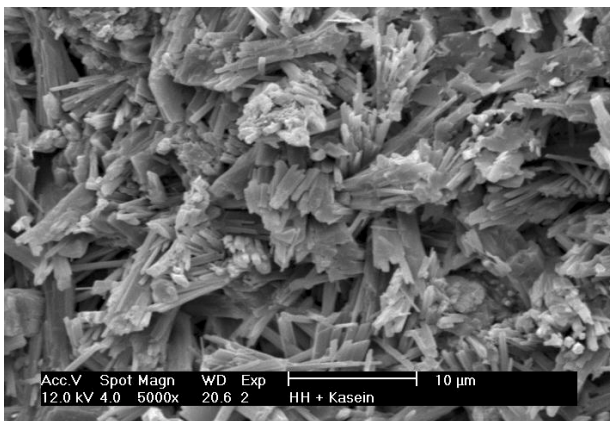
	$\beta_{Bz} - 28 d$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28 d$ [N/mm ²]	$E_{dyn.} - 28 d$ [kN/mm ²]
β -HH	8,32	32,3	12,6
β -HH + Kg	5,97	16,8	8,9
β -HH + Ks	8,23	26,7	12,6
β -HH + La	6,36	19,5	11,5
β -HH + Tb	7,85	22,3	11,6
	W/B [-]	VB [min]	Masseverlust ¹⁾ [%]
β -HH	0,43	13	79
β -HH + Kg	0,42	180	75
β -HH + Ks	0,44	12	71
β -HH + La	0,44	64	80
β -HH + Tb	0,45	36	77

1) bestimmt nach Methode II, siehe Kapitel 2.5

Bei allen Pasten hat die Zugabe der entsprechenden Proteine eine Abnahme der Festigkeiten zur Folge. Die Festigkeiten werden direkt durch die verzögernde Wirkung der Zusatzmittel beeinflusst, welche beim Kollagen und Lactalbumin mit 180 bzw. 64 min bis zum Versteifungsbeginn besonders deutlich ist. Dieser stark verzögernde Effekt spiegelt sich auch in der Kristallgröße wieder (siehe Abbildung 40 - Abbildung 43).

**Abbildung 40:**

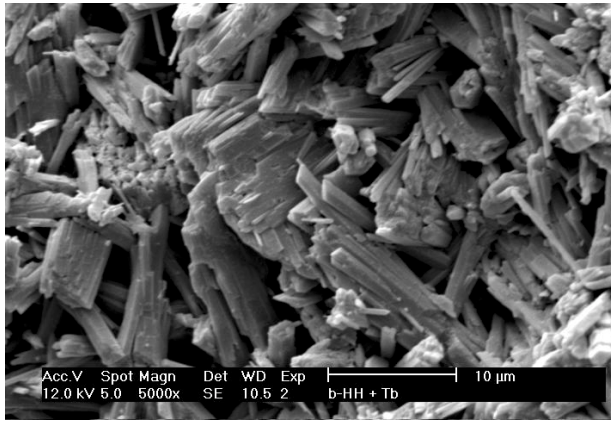
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus reinem β -HH bei Zugabe von Kollagen

**Abbildung 41:**

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus β -HH bei Zugabe von Kasein

**Abbildung 42:**

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus β -HH bei Zugabe von Lactalbumin (Milcheiweiß)

**Abbildung 43:**

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer erhärteten Gipspaste aus β -HH bei Zugabe von Trockenblut

Auch bei Zugabe von Eiweiß zu β -Halbhydrat ist keine bzw. nur eine geringfügige Verbesserung der Wasserresistenz zu beobachten. Trotz stark vergrößerter Kristalle, z.B. beim Kollagen (siehe Abbildung 40), nimmt der Masseverlust nur um ca. 7 % ab.

Der Einfluß solcher Eiweiße auf andere Calciumsulfat-Phasen wurde am Beispiel der Mischung Thermoanhydrit - Kollagen untersucht. Beim Anhydrit, der in der Regel angeregt wird, um den erforderlichen Umsatz zum Dihydrat zu erreichen, wurde diese Reaktion durch die genannten Zusatzmittel stark verlangsamt. Es resultierten niedrige Festigkeiten und eine geringe Wasserresistenz (siehe Tabelle A 11).

5.3.2.1 Einfluß der Eiweiß-Konzentration

Der Einfluß der Zusatzmittel-Konzentration wurde am Beispiel des Kollagens untersucht (siehe Tabelle A 10 im Anhang). Schon bei Zugabe von 1,5 M.-% Kollagen zum β -HH sind die Festigkeiten nach 28 d so gering, daß sie nicht mehr erfaßt werden können. Zurückzuführen ist das auf die stark verzögernde Wirkung des Kollagens, was zu einem Versteifungsbeginn der Gipspaste von über 24 h führt. Trotz einer Vergrößerung der Kristalle kann die Wasserresistenz nicht weiter verbessert werden, wohl auch weil durch den Einsatz des Kollagens vermehrt Poren in den Frischmörtel eingebracht werden.

5.3.3 Fazit

Auch beim Einsatz weiterer Zusatzmittel in Vorversuchen wie z.B. Entschäumer oder Fließmittel in Kombination mit Kollagen konnte festgestellt werden, daß die verzögernde Wirkung dieser Stoffe nahezu immer eine Verschlechterung, in keinem Fall jedoch signifikante Verbesserungen der Wasserresistenz verursachte.

Besonders deutlich ist dies bei Gipspasten auf Anhydritbasis. Die ohnehin geringere Reaktivität dieser Bindemittel wird durch die Zugabe von Zusatzmitteln oft stark beeinflusst (→ verzögernde Wirkung). Der resultierende geringe Rehydratationsgrad dieser Gipspasten steht in direktem Zusammenhang mit der Wasserresistenz.

Ein alleiniger Einsatz von Zusatzmitteln erscheint daher nicht als der richtige Weg, die Wasserresistenz von Gipsbaustoffen zu erhöhen. In Kombination mit anderen Zusatzstoffen sind jedoch durchaus positive Eigenschaftsänderungen zu erwarten.

5.4 Einfluß anderer Bindemittel/Zusatzstoffe

Neben der Modifizierung von α - oder β -Halbhydrat mit Zusatzmitteln wurde versucht, das Calciumsulfatsystem durch Zugabe anderer Bindemittel/Zusatzstoffe (hydraulische, carbonatische etc.) wasserbeständiger zu machen. Erhärtete Gipspasten basierend auf Thermoanhydrit (TA) bzw. auf α -Halbhydrat (α -HH) zeigten in Vorversuchen die höchsten Wasserresistenzen.

Es wurden daher zunächst Mischungen dieser Calciumsulfate mit Kalk (CL 80, HL 2) untersucht. In einer weiteren Versuchsreihe wurden Mischungen aus Naturanhydrit (NA) und Weißkalkhydrat (CL 80) untersucht.

5.4.1 Einsatz unterschiedlicher Kalke

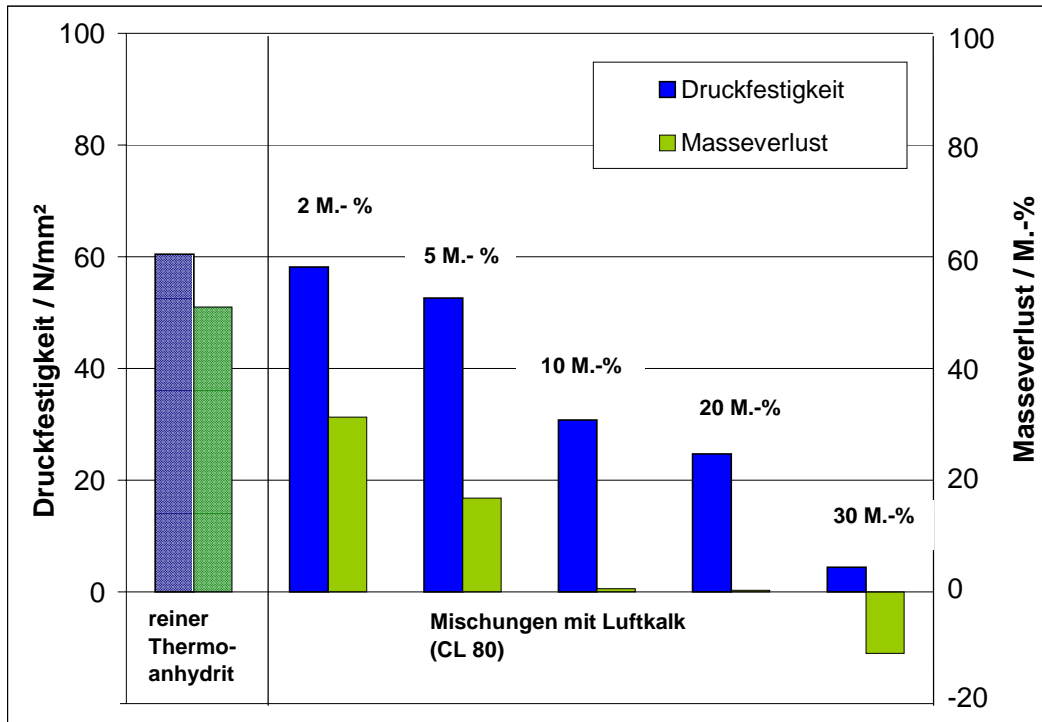
Eingesetzt wurde ein Luftkalk (CL 80) sowie ein hydraulischer Kalk (HL 2). Der Kalkgehalt wurde in Mengen von 2 M.-% bis 40 M.-% der Bindemittelrezeptur zugegeben. Den Mischungen mit Anhydrit (TA, NA) wurde 0,6 % Kaliumsulfat (bezogen auf den Anhydrit) als Anreger zugesetzt. Die Herstellung erfolgte nach Kap. 2.2.1, die Pasten wurden auf ein Ausbreitmaß von $16,5 \pm 0,5$ cm eingestellt.

Die Zugabe von Kalk (CL 80, HL2) erhöht bei allen verwendeten Calciumsulfaten (TA, NA, α -HH) den Wasserbedarf der Bindemittelpasten. Im Vergleich zu den Pasten der reinen Sulfat-Phasen wirkt die Zugabe von Kalk tendenziell verzögernd; die verzögernde Wirkung ist dabei abhängig von der zugegebenen Menge an Kalk. Ausgewählte Kennwerte der Rezepturen zeigt Tabelle A 12 im Anhang.

Unter anderem aufgrund eines erhöhten Wasserbedarfs ist eine Erniedrigung der Festigkeiten mit steigendem Kalkgehalt zu beobachten. Gleichzeitig wird jedoch der Masseverlust bei Lagerung in fließendem Wasser (Methode II, Kapitel 2.3.5.1) deutlich reduziert. Die folgende

Abbildung 44 zeigt beispielhaft Druckfestigkeiten und Masseverlust der mit Weißkalkhydrat (CL 80) modifizierten Mischungen auf Basis von Thermoanhydrit (TA).

Abbildung 44: Druckfestigkeit nach 28 d und Masseverlust bei Lagerung in fließendem Wasser, Bindemittelpasten basierend auf Thermoanhydrit (TA) und Luftkalk (CL 80)



Während sich die Druckfestigkeiten erst ab einer Zugabe von 5 M.-% deutlich ändern, sinkt der Masseverlust (= Erhöhung der Wasserresistenz) nahezu exponentiell mit der Zugabe von Weißkalkhydrat. Schon bei einer Beimischung von 2 M.-% Kalk wird der ermittelte Masseverlust im Vergleich zum reinen Thermoanhydrit halbiert. Der Massenverlust einer Mischung mit 10 M.-% Weißkalkhydrat liegt nur noch bei ca. 0,5 M.-%. Bei Zugabe von 30 bzw. 40 M.-% Weißkalkhydrat läßt sich eine Massenzunahme feststellen, die wahrscheinlich auf eine Carbonatisierung der Mörtel durch die Feuchtlagerung zurückzuführen ist.

Diese Tendenzen lassen sich auch bei anderen Calciumsulfat-Phasen (NA, α -HH), sowie bei der Zugabe von hydraulischem Kalk (HL 2) beobachten (vgl. Tabelle A 12).

In Korrelation zu den W/T-Werten erreichen Mischungen mit hydraulischem Kalk (HL 2) deutlich höhere Festigkeiten als solche, denen Weißkalkhydrat (CL 80) zugesetzt wurde. Auch hier wird erst bei Zusatz von 20 – 30 M.-% HL 2 eine ausreichende Wasserresistenz beobachtet.

Erhärtete Bindemittelpasten auf Basis von α -HH und NA zeigen deutlich niedrigere Festigkeiten als alle Mischungen auf TA-Basis. Eine vergleichbare Erhöhung der

Wasserresistenz gegen lösenden Angriff (wie in Abbildung 44 gezeigt) wird erst bei Zugabe größerer Mengen an Kalk erreicht.

Bei Verwendung von α -Halbhydrat ist der Einfluß geringer Mengen Weißkalkhydrat auf andere Eigenschaften, wie das Ansteifverhalten, die Gefügeausbildung und die resultierenden Festigkeiten jedoch sehr hoch. Die Modifizierung des α -Halbhydrats mit Weißkalkhydrat führt zu einer Verzögerung des Abbindeprozesses [vgl. BENZ] und zu einer Gefügeveränderung. Der Gips kristallisiert nicht mehr in feinen, stark verzahnten Nadeln, sondern grobkristallin (vgl. FORG). Aus diesem Grund sinken die Festigkeiten, da der Zusammenhalt, der durch die starke Verfilzung zwischen den Kristallen entsteht, nicht mehr gegeben ist.

Die erhöhte Wasserresistenz der mit Kalk modifizierten Pasten läßt sich zum einen auf eine Verringerung der Oberfläche durch die Vergrößerung der Kristalle zurückführen (hauptsächlich im Falle der Halbhydrate, siehe Abbildung 45), zum anderen wird durch die schwer löslichen Calcitkristalle ein Kalkgerüst aufgebaut, das auch dann noch bestehen bleibt, wenn der Gips bereits vollständig gelöst ist (siehe Abbildung 46). Die folgenden REM-Aufnahmen belegen dies am Beispiel der Mischung aus α -HH und CL 80 (90/10).

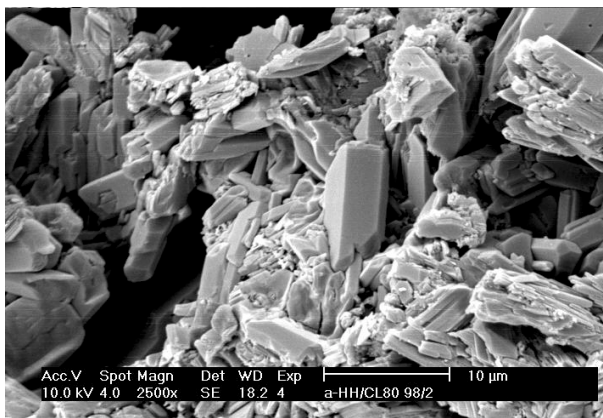


Abbildung 45:
Mischung aus α -HH und CL 80, deutlich vergrößerte Kristallausbildung, vgl. Abbildung 32

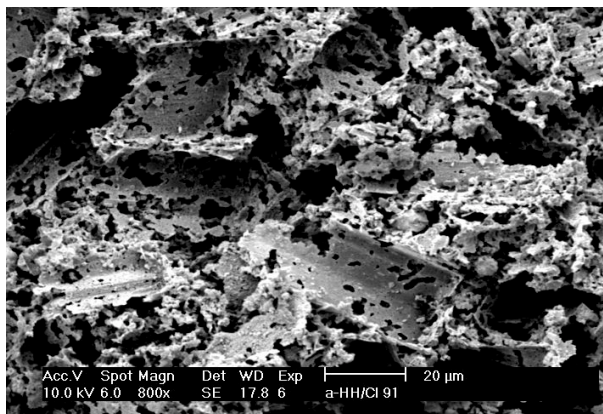
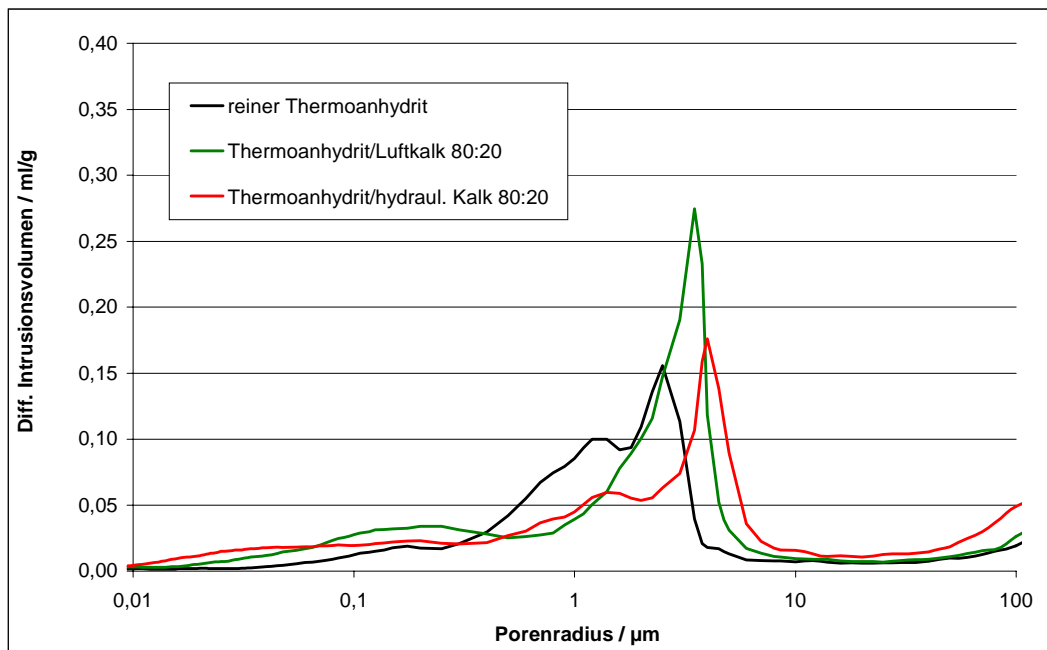


Abbildung 46:
Mischung aus α -HH und CL 80 nach Lagerung in fließendem Wasser, zurückbleibendes Kalkgerüst in der Randzone des Probekörpers, erkennbar: Fehlstellen, in denen Gipskristalle aufgelöst wurden, vgl. Abbildung 30

Auf eine Verdichtung des Gefüges, also z.B. eine Verringerung der Porosität, ist die Verbesserung der Wasserresistenz nicht zurückzuführen. Darauf weisen die Ergebnisse der Hg-Druckporosimetrie hin (siehe Abbildung 47).

Abbildung 47: Porenradienverteilung der erhärteten Bindemittelpasten basierend auf reinem Thermoanhydrit und unterschiedlichen Kalken (CL 80 und HL 2)



Bedingt durch den höheren Wasserbedarf der mit Kalk modifizierten Rezepturen ist die Gesamtporosität dieser Mischungen im Vergleich zum TA leicht erhöht. Das Maximum der Porenradienverteilung wird zu größeren Poren (im Bereich der Kapillarporen) verschoben. Aufgrund der erhöhten Porosität, die vorwiegend auf einen höheren Anteil der für den Feuchtetransport relevanten Kapillarporen zurückzuführen ist, wäre eher mit einer Verschlechterung der Wasserresistenz bei diesen Mischungen zu rechnen.

Hygrisches Verhalten

Neben Frischmörtelkennwerten und den mechanischen Eigenschaften wurde auch das Quellen und Schwinden der mit Kalk modifizierten erhärteten Bindemittelpasten während der Vorlagerung und den sich anschließenden, weiteren Lagerungen nach Kapitel 2.3.5 untersucht. Das Quellen/Schwinden während der Vorlagerung (20/65, 1 Vol.-% CO₂-Anreicherung) und anschließender trockener Lagerung bei 23/50 ist in Abbildung 48 dargestellt:

Abbildung 48: Quellen/Schwinden der erhärteten Anhydrit-Kalkpasten während der Vorlagerung

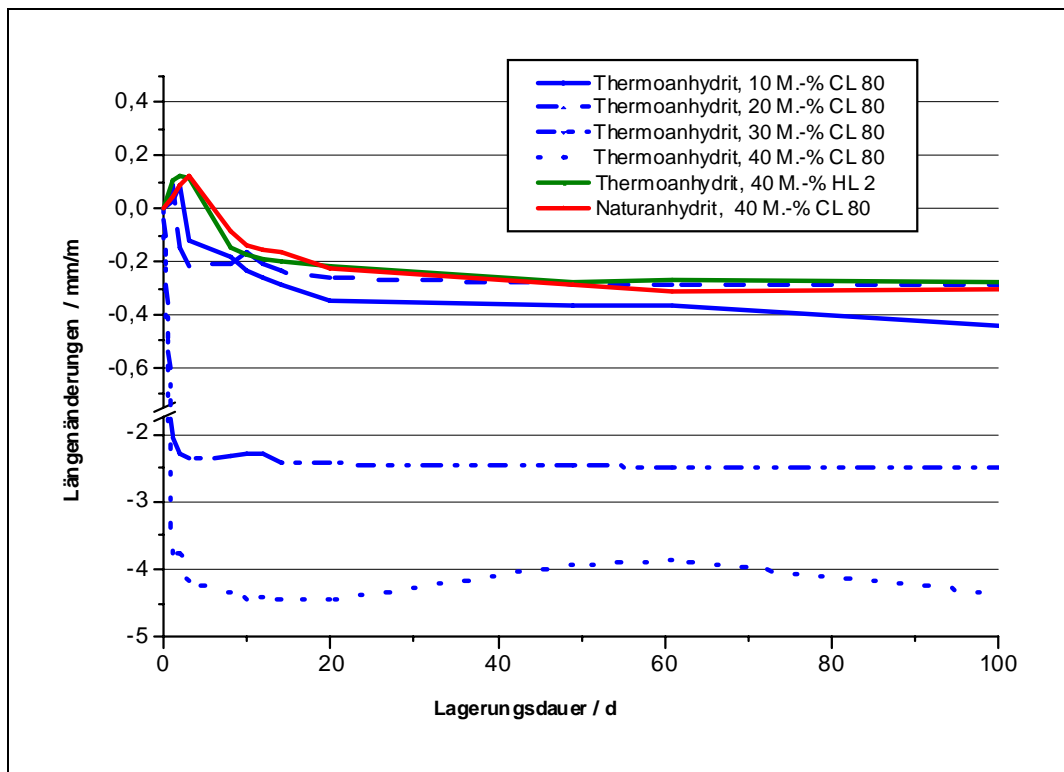
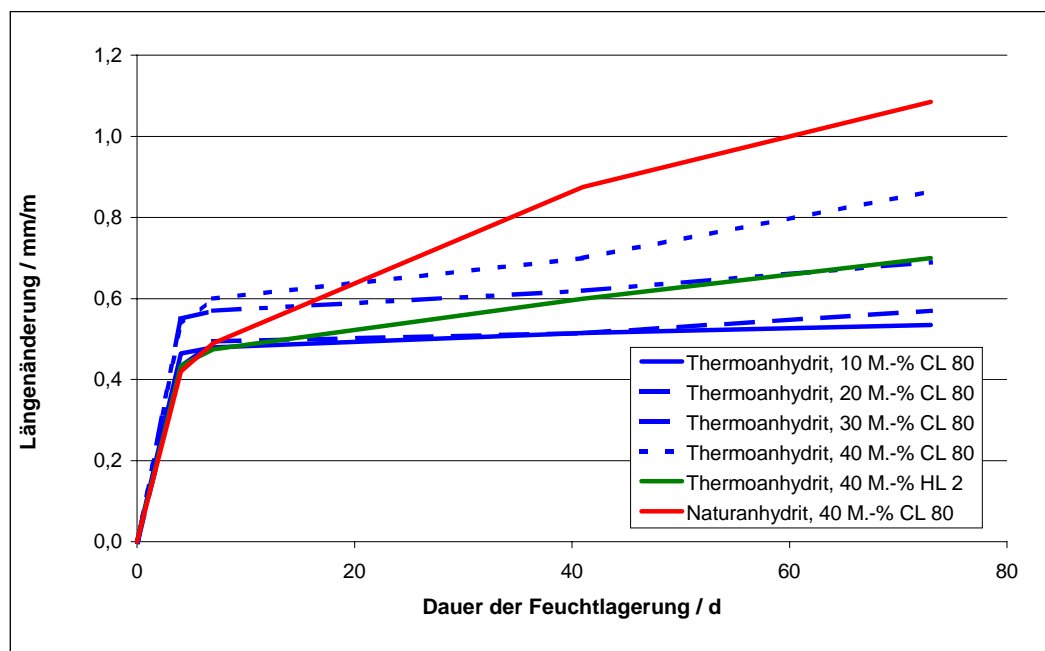


Abbildung 48 zeigt, daß Mischungen mit Thermoanhydrit und einem Anteil von 30 – 40 M.-% Weißkalkhydrat ein so starkes Schwinden aufweisen (-2 bzw. -4 mm/m), daß sie für eine weitere Optimierung nicht mehr geeignet erscheinen. Alle anderen Mischungen zeigen nach einem anfänglichen Quellen ein Schwinden auf Werte von 0 – -0,4 mm/m. Tendenziell ist das Schwinden um so stärker, je höher der Kalkgehalt und damit auch der Wassergehalt der Mörtel ist.

Werden die erhärteten Bindemittelpasten nach Erreichen konstanter Schwindwerte unter Wasser gelagert, so beobachtet man zunächst ein durch die Wasseraufnahme bedingtes, reversibles Quellen der Proben. Hierbei werden in Abhängigkeit von der Ausgangsmischung Werte zwischen 0,27 und 0,6 mm/m erreicht. Mit zunehmender Lagerungsdauer finden jedoch Quellvorgänge statt, die auf einer verspäteten Reaktion Anhydrit→Gips beruhen und aus diesem Grunde nicht reversibel sind.

Abbildung 49 zeigt dies am Beispiel ausgewählter Mischungen basierend auf Thermoanhydrit und Naturanhydrit und den verwendeten Kalken (CL 80 bzw. HL 2).

Abbildung 49: Quellen ausgesuchter erhärteter Anhydrit/Kalk-Pasten bei Lagerung unter Wasser



Calciumhydroxid beschleunigt die oben genannte Reaktion vom Anhydrit zum Gips. Aus diesem Grund ist bei den Mischungen mit CL 80 ein stärkeres Quellen mit zunehmendem Kalkanteil zu beobachten. Dieses Quellen ist größer als bei vergleichbaren Mischungen mit hydraulischem Kalk (HL 2). Erhärtete Bindemittelpasten auf Basis von Naturanhydrit besitzen aufgrund eines geringeren Rehydratationsgrades ein erhöhtes Potential für eine verspätete Hydratation. Das erklärt das überdurchschnittlich starke Quellen dieser Mischungen bei Lagerungen unter Wasser. Zu einer Zerstörung der Probekörper kommt es aber auch bei weiterer Wasserlagerung nicht.

Unabhängig von der Art des verwendeten Anhydrits (TA, NA) und der Art des verwendeten Kalkes (CL 80, HL 2) liegen die Quellwerte um so höher, je höher der Kalkgehalt ist.

5.4.2 Einsatz unterschiedlicher Zemente

Neben dem Einsatz von Kalken wurde auch der Einfluß von Zementen auf die Eigenschaften von Gipsmörteln, besonders im Hinblick auf die Wasserresistenz untersucht. Bei den Lagerungen zur Untersuchung der Wasserresistenz wurde besonderes Augenmerk auf eventuell auftretende Quell- bzw. Treiberscheinungen gerichtet, die auf eine Ettringitbildung hinweisen könnten. Bei der Reaktion von Calciumsulfat mit dem Tricalciumaluminat des Zementes (C_3A)

kommt es zu einer Volumenzunahme auf das Achtfache. Diese Reaktion ist weitestgehend im plastischen Zustand abgeschlossen. Bei anhaltender Feuchte oder wechselnden Feuchtebedingungen kann es ggf. auch im erhärteten Mörtel zu einer sekundären Ettringitbildung und damit zu Treiberscheinungen kommen.

Um solche Effekte zu minimieren, wurden Untersuchungen mit einem HS-Zement (CEM III/B 42,5 R - HS) durchgeführt. Ein solcher Zement enthält mehr als 66 % Hüttensand. Zum Vergleich wurden Versuche mit einem Weißzement (WZ) durchgeführt, der in der Regel deutlich höhere Anteile des für eine Ettringitbildung relevanten Tricalciumaluminats (C_3A) aufweist als normaler Portlandzement. Die Zemente wurden in Mengen von 10 und 20 M.-% mit Thermoanhydrit gemischt. Weiterhin wurden Rezepturen untersucht, die mit 10 M.-% Weißkalkhydrat (CL 90) und 10 M.-% Zement (HSZ und WZ) modifiziert waren.

Die Mischungen wurden auf ein Ausbreitmaß von $13,5 \pm 0,5$ cm eingestellt und wie in Kapitel 2.2 beschrieben hergestellt. Dem Anhydrit wurde 0,6 M.-% Kaliumsulfat als Anreger zugesetzt.

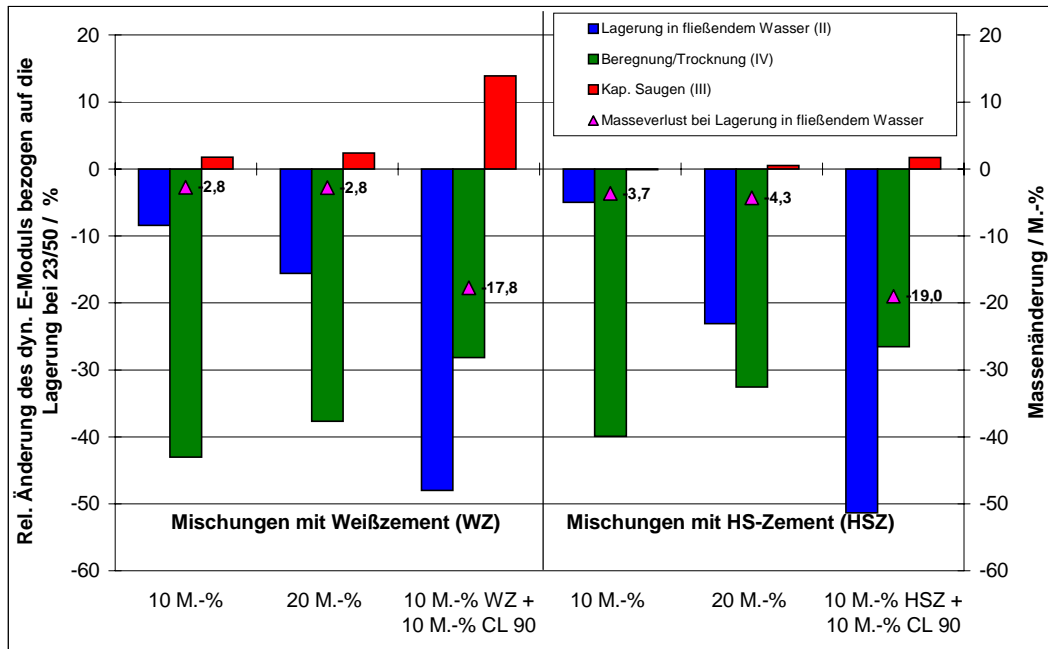
Die derart hergestellten Prüfkörper wurden einem Teil der in Kapitel 2.3.5 beschriebenen Prüfmethodik unterzogen (Verfahren II, III und IV). Ausgewählte Frisch- und Festmörtelkennwerte dieser Mischungen nach Vorlagerung sowie nach Beendigung der Verfahren zur Prüfung der Wasserresistenz zeigen Tabelle A 13 und Tabelle A 14 im Anhang. E-Moduln und Festigkeiten der untersuchten Mischungen sind relativ hoch. Zurückzuführen ist das u.a. auf den relativ geringen Wasserbedarf des Trockenmörtels bei entsprechendem Ausbreitmaß, die hydraulische Erhärtung des zugegebenen Zementes führt zu einer weiteren Steigerung der Festigkeit im Vergleich zu reinen Gipspasten. Je höher der Zementanteil der Gipspasten, um so höher sind auch die Festigkeiten der Prüfkörper. Mit Druckfestigkeiten > 50 N/mm² und einem dyn. E-Modul von im Mittel mehr als 20 kN/mm² sind diese Festmörtelkennwerte deutlich höher als im Anforderungsprofil festgelegt.

Die Art des verwendeten Zementes spielt dabei kaum eine Rolle. Bei gleichen Zementgehalten im Bindemittel werden nahezu identische Kennwerte ermittelt.

Bei Prüfung der Wasserresistenz ist zwar ein positiver Einfluß der eingesetzten Zemente auf den Massenverlust zu beobachten, gleichzeitig treten bei einigen Lagerungen jedoch deutliche Änderungen der E-Moduln bzw. deutliche Längenänderungen auf.

Abbildung 50 zeigt die relativen Änderungen des dynamischen E-Moduls durch die Prüfung der Wasserresistenz und den Masseverlust bei Lagerung in fließendem Wasser.

Abbildung 50: Änderung des dynamischen E-Moduls nach Abschluß der Lagerungen II-IV, bezogen auf den dynamischen E-Modul bei trockener Lagerung, sowie Masseverlust der erhärteten Bindemittelpasten nach 28-tägiger Lagerung II

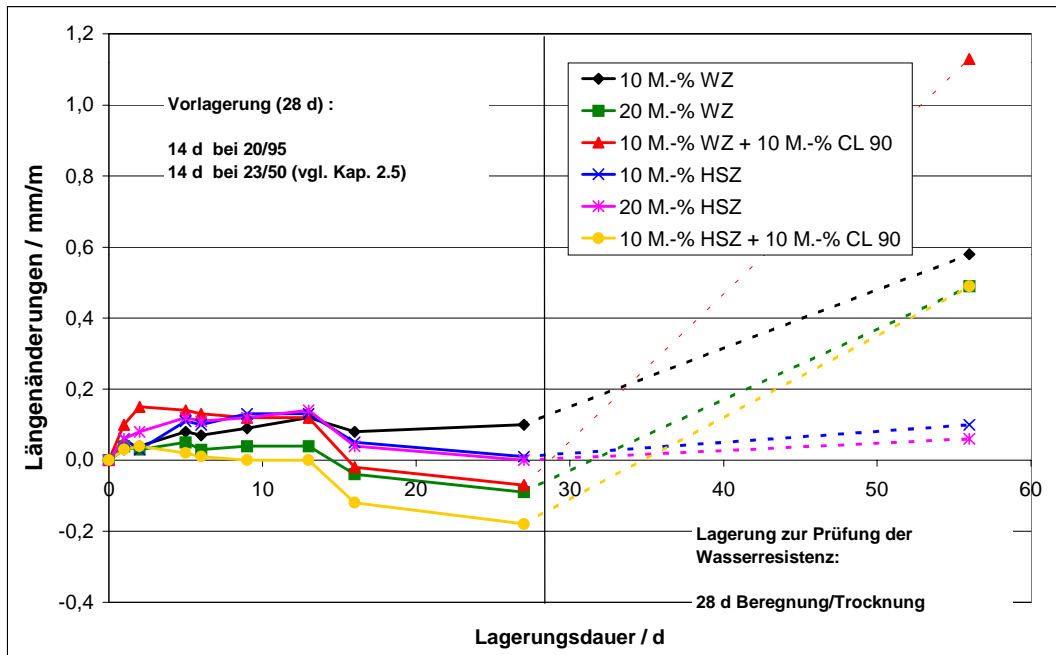


Trotz relativ geringer Massenverluste und teilweise geringer Quellwerte bei Feucht- und Wechsellagerung, ist die Änderung des E-Moduls während der Lagerungen zur Untersuchung der Wasserresistenz mitunter bedeutend. Besonders große Auswirkungen hat eine Beregnung/Trocknung auf die erhärteten Gips/Zement-Pasten. Die E-Moduln sinken dabei auf nahezu die Hälfte ihrer Ausgangswerte. Obwohl nur bei einigen Proben erhöhte Quellwerte gemessen werden können (vgl. Abbildung 51), sind in allen Proben deutlich Risse erkennbar, die in machen Fällen zum Bruch der Prüfkörper führten. Der Zusatz von Weißkalkhydrat (CL 90) wirkt sich positiv auf die Entwicklung der E-Moduln aus. Bei entsprechenden Mischungen fällt der prozentuale E-Modul-Abfall wesentlich geringer aus. Eine ständige Wasseraufnahme durch kapillares Saugen führt bei diesen Mischungen zu einer deutlichen Steigerung der E-Moduln.

Die Längenänderungen der zementhaltigen Bindemittelpasten während der Vorlagerung und nach Abschluß der Lagerung IV (Beregnung/Trocknung) zeigt Abbildung 51.

Nach einem anfänglichen leichten Quellen bis auf Werte von maximal 0,15 mm/m (TA/WZ/CL 90 811) ist bei allen Mischungen ein Schwinden zu beobachten. Die größten Schwindwerte (- 0,2 mm/m) werden dabei von den erhärteten Gipspasten erreicht, die zusätzlich zum Zement Kalk enthalten (TA/WZ/CL 90 811, TA/HS-Z/CL 90 811), gefolgt von den Rezepturen mit 20 M.-% Zementanteil.

Abbildung 51: Längenänderungen während der 28-tägigen Vorlagerung (vgl. Kap. 2.5) sowie nach Abschluß der Lagerung IV (28 d)



Insgesamt sind die erreichten Quell-/Schwindmaße jedoch relativ gering.

Abbildung 51 zeigt weiterhin beispielhaft für Lagerung IV das Quellen der Bindemittelpasten bei Prüfung der Wasserresistenz, ausgehend von den Ausgangswerten bei Beendigung der Vorlagerung. Ein starkes Quellen durch die Beregnung/Trocknung ist bei den Mischungen mit Weißzement festzustellen (0,58 mm/m bei 20 M.-% WZ), während die mit HS-Zement modifizierten Pasten ein deutlich geringeres Quellen von ca. 0,10 mm/m aufweisen. Auffallend sind die stark erhöhten Quellwerte der Bindemittelpasten, die zusätzlich zum Zement noch Weißkalkhydrat enthalten (0,90 mm/m bei Mischungen mit WZ, 0,67 mm/m bei Mischungen mit HSZ).

Die mit C_3A -armen HS-Zement modifizierten Gipspasten zeigen bezüglich aller untersuchten Kenngrößen (Massenänderung, E-Modul, Q/S) erwartungsgemäß eine bessere Wasserresistenz als vergleichbare Rezepturen mit Weißzement.

Als Ursache für die Veränderungen (Sinken der E-Moduln, Quellen, Rißbildung) ist vermutlich eine Ettringitbildung und damit verbundene Gefügeänderungen zu nennen, da die Effekte tendenziell mit zunehmendem Zementgehalt deutlicher ausfallen. Aber auch eine Reaktion Anhydrit→Gips kann im erhärteten Mörtel zu Schäden führen. Die deutlich erhöhte Schädigung der Pasten, die Weißkalkhydrat enthielten, läßt sich vermutlich durch eine Anregung dieser Reaktion in Anwesenheit von $Ca(OH)_2$ erklären.

5.4.3 Einsatz weiterer Zusatzstoffe

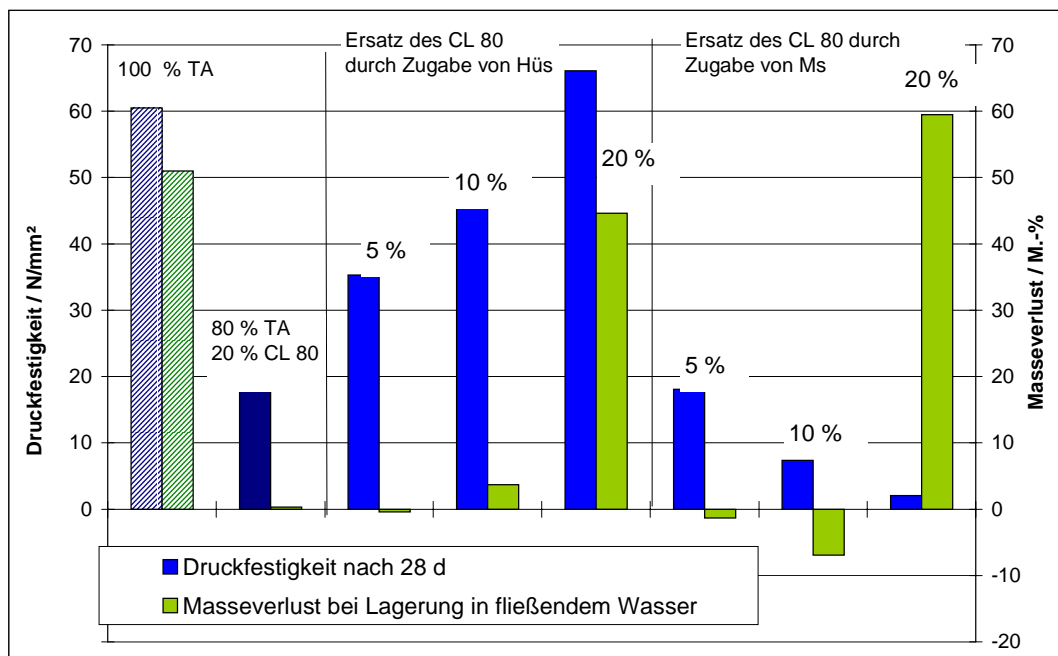
Neben den Bindemitteln Kalk und Zement wurde der Einfluß weiterer Zusatzstoffe, z.T. in Kombination mit Kalk, untersucht. Zum Einsatz kamen Hüttensand und Microsilica in Kombination mit thermischem Anhydrit (TA) und Weißkalkhydrat (CL 80). Hüttensand und Microsilica wurden in Mengen von 5 – 20 M.-% dem Anhydrit zugesetzt, Kalk wurde in Mengen von 10 bzw. 15 M.-% zugegeben.

Die Mischungen wurden wie in Kapitel 2.2 beschrieben hergestellt und auf ein Ausbreitmaß von $16,5 \pm 1,0$ cm eingestellt.

Im folgenden Diagramm (Abbildung 52) sind die Druckfestigkeiten nach 28 d und der Masseverlust nach Lagerung in fließendem Wasser dargestellt. Zum Vergleich zeigt die Grafik zusätzlich eine Mischung aus reinem Thermoanhydrit (TA), sowie eine vergleichbare Probe mit Thermoanhydrit und Kalk (TA 80% /CL 80 20 %).

Weitere Kennwerte der oben beschriebenen Mischungen finden sich im Anhang (siehe Tabelle A 15).

Abbildung 52: Druckfestigkeiten nach 28 d und Masseverlust nach 28-tägiger Lagerung in fließendem Wasser (II) der erhärteten Bindemittelpasten aus Anhydrit (TA), Weißkalkhydrat (CL 80), Hüttensand (Hüs) bzw. Microsilica (Ms)



Bei einem Zusatz von 20 M.-% Hüttensand kann eine Steigerung der Festigkeit um ca. 10 % erreicht werden (im Vergleich zu reinem TA). Der Masseverlust wird im Vergleich zum reinen Thermoanhydrit (TA: Masseverlust 51 %) jedoch nur geringfügig gesenkt. Eine Reduktion des Anteils an Hüttensand bei gleichzeitiger Zugabe von Weißkalkhydrat (z.B. 10 % Hüs, 10%

CL 80) bewirkt eine Abnahme der Festigkeit, noch unter die Werte des reinen Thermoanhydrits. Mit Werten von 35 N/mm^2 und mehr sind die Festigkeiten jedoch immer noch sehr hoch.

Der Masseverlust wird bei Einsatz von Hüttensand in Kombination mit Weißkalkhydrat entscheidend verbessert. Bei Lagerung in fließendem Wasser werden nur noch ca. 5 M.-% der Probe gelöst.

Bei Zugabe von 20 M.-% Microsilica zum Thermoanhydrit ist keine Verbesserung der Wasserresistenz zu beobachten, sondern ein höherer Massenverlust als beim reinen Thermoanhydrit. Wird der Microsilica-Anteil bei gleichzeitiger Zugabe von Weißkalkhydrat gesenkt (10 % Ms / 10 % CL 80 bzw. 5 % Ms / 15 % CL 80), kann eine Erhöhung der Wasserresistenz, wie beim Einsatz von Hüttensand, beobachtet werden. Die Festigkeit steigt hingegen bei einer Kombination mit Weißkalkhydrat. Begründen läßt sich dies folgendermaßen: In einer reinen TA/Ms-Mischung kann Microsilica nur als Füller wirken (vgl. Abbildung 53). Der Füller umhüllt die Anhydrit- bzw. Gipspartikel und verhindert so eine ausreichende Verzahnung der Gipskristalle. Ein unzureichender Verbund zwischen Füller und Gipsstein schlägt sich in geringen Festigkeiten und einer ebenfalls geringeren Wasserresistenz nieder. Bei Zugabe von Kalk reagiert Microsilica mit Calciumhydroxid zu gelartigen C-S-H-Phasen [LINDER] und trägt damit zur Festigkeit und zur Erhöhung der Wasserresistenz bei.

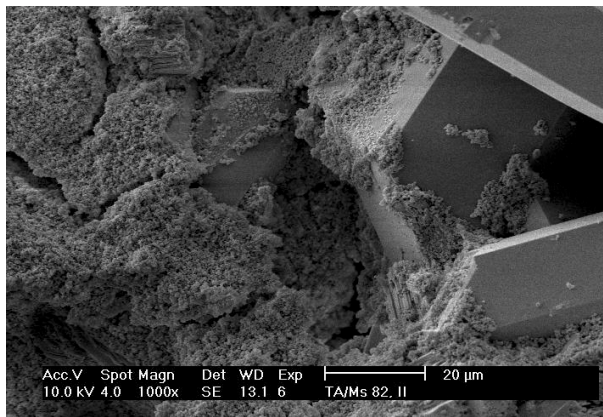
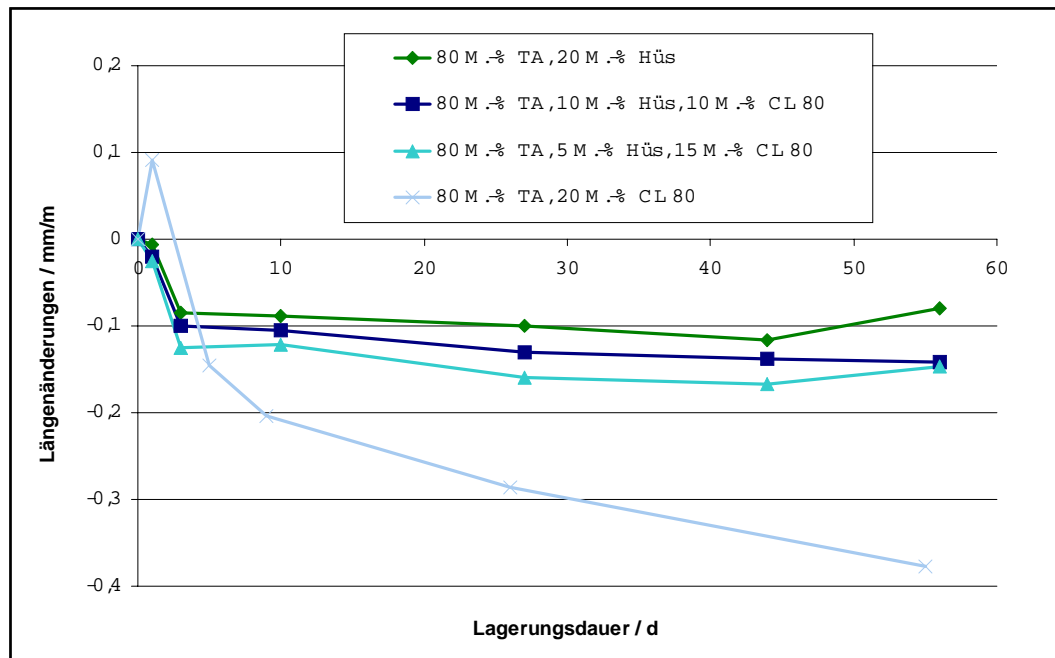


Abbildung 53:

REM-Aufnahme einer erhärteten Bindemittelpaste aus Thermoanhydrit und Microsilica, Umhüllung der Gipskristalle mit dem Füller Microsilica

Der Vorteil bei einem Einsatz von Hüttensand liegt im Vergleich zu reinen Gips-Kalk-Pasten vorwiegend in der Reduktion der Schwindwerte, wie Abbildung 54 zeigt. Zum Vergleich ist nochmals das Quellen/Schwinden einer reinen Anhydrit/Kalk-Mischung (80 % TA, 20 % CL 80) dargestellt.

Abbildung 54: Quellen/Schwinden erhärteter Gipspasten mit Weißkalkhydrat (CL 80) und Hüttensand (Hüs) bei trockener Lagerung (Vorlagerung, Lagerung bei 23/50, vgl. Kap. 2.5)



Im Vergleich zu den bereits untersuchten Anhydrit-Kalk-Pasten kann das Schwinden bei Einsatz von Hüttensand auf Werte von $-0,08$ – $-0,14$ mm/m, also um ein Drittel, gesenkt werden.

5.4.4 Einsatz inerter Füllstoffe

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Mischungen aus Thermoanhydrit, Kalk und diversen Zusatzstoffen weisen im Vergleich zu Gipsmörteln aus β -HH eine ausreichende Wasserresistenz auf. Negativ zu bewerten sind jedoch die relativ hohen Schwindwerte und Festigkeiten. Diese Größen lassen sich durch die Zugabe von inerten Zusatzstoffen oder Zuschlag (vgl. Kapitel 5.5) beeinflussen. Aus diesem Grund wurden Mischungen mit Kalksteinmehl untersucht.

Die in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Bindemittelrezepturen, bestehend aus Thermoanhydrit (TA) und Weißkalkhydrat (CL 80) bzw. hydraulischem Kalk (HL 2), wurden im Verhältnis 1:1 mit Kalksteinmehl (Kstm) gemagert. Die Bindemittelpasten wurden wie in Kapitel 2.2 beschrieben hergestellt und auf ein Ausbreitmaß von $16,5 \pm 1,0$ cm eingestellt.

Ausgesuchte Kennwerte dieser Mischungen zeigt die Tabelle 7.

Tabelle 7: Kennwerte mit Kalksteinmehl gemagerter Anhydrit/Kalk-Mischungen

Zusammensetzung der Bindemittelpasten	$\beta_{Bz} - 28d$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28d$ [N/mm ²]	$E_{dyn.} - 28d$ [kN/mm ²]
45% TA, 5 % CL 80, 50 % Kstm	7,72	27,8	15,0
40% TA, 10 % CL 80, 50 % Kstm	5,83	19,2	14,5
35% TA, 15 % CL 80, 50 % Kstm	2,09	6,0	11,9
45% TA, 5 % HL 2, 50 % Kstm	6,46	20,9	19,6
40% TA, 10 % HL 2, 50 % Kstm	5,95	20,0	14,2
35% TA, 15 % HL 2, 50 % Kstm	4,00	12,8	7,1
	W/T-Wert [-]	VB [min]	Masseverlust ¹⁾ [%]
45% TA, 5 % CL 80, 50 % Kstm	0,56	100	5,9
40% TA, 10 % CL 80, 50 % Kstm	0,61	140	2
35% TA, 15 % CL 80, 50 % Kstm	0,67	265	0,9
45% TA, 5 % HL 2, 50 % Kstm	0,56	180	4
40% TA, 10 % HL 2, 50 % Kstm	0,60	200	5,8
35% TA, 15 % HL 2, 50 % Kstm	0,62	240	-0,8 :Gew.-Zunahme

1) bestimmt nach Methode II, vgl. Kapitel 2.5

Der Wasserbedarf der mit Kalksteinmehl im Verhältnis 1:1 gemagerten Mischungen ist höher als bei reinen Anhydrit/Kalk-Mischungen. Alle Mörtel bzw. Pasten besitzen eine ausreichende Verarbeitbarkeitszeit. Die Festigkeiten und E-Moduln sind niedriger als bei vergleichbaren Mischungen ohne Kalksteinmehl und liegen in dem durch das Anforderungsprofil vorgegebenen Bereich von 10 – 20 N/mm².

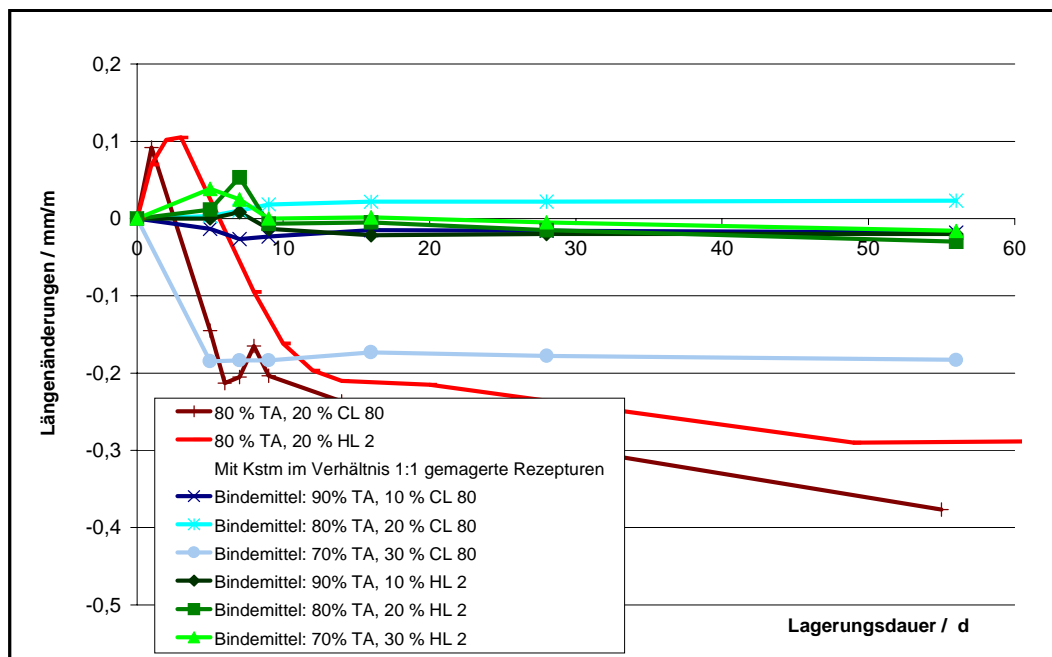
Besonders deutlich ist diese Festigkeitserniedrigung bei den Mischungen mit hydraulischem Kalk. Durch den insgesamt geringeren Anteil Kalk am Gesamt-Trockenmörtel (5 - 15 M.-%) fallen Unterschiede, die durch die Verwendung verschiedener Kalke (CL 80, HL 2) bedingt sind, geringer aus.

Trotz eines deutlich erhöhten Wasseranspruchs der gemagerten Bindemittelpasten (W/T-Wert: ca. 0,6) und damit einer erhöhten Porosität (32 %) wird die Wasserresistenz im Vergleich zu den reinen Bindemittel-Mischungen nur gering beeinflusst, wie die Werte in Tabelle 7 zeigen (vgl. Abbildung 44 bzw. Tabelle A 12). Begründen läßt sich dies u.a. durch den geringeren

Anteil der „leicht löslichen“ Komponente Anhydrit an der Gesamtmischung. Während bei den Mischungen mit Weißkalkhydrat eine geringfügige Verschlechterung der Wasserresistenz zu beobachten ist, kann diese bei den Bindemittelpasten mit hydraulischem Kalk bei Zugabe von Kalksteinmehl noch verbessert werden.

Das Quellen/Schwinden der gemagerten Gipspasten im Vergleich mit den reinen Bindemittelrezepturen (80 % TA, 20 % CL 80 bzw. HL 2) zeigt Abbildung 55.

Abbildung 55: Quellen/Schwinden mit Kalksteinmehl gemagelter Anhydrit-Kalk-Mischungen bei trockener Lagerung (28 d Vorlagerung, dann 23/50, siehe 2.5)



Der Ersatz von Bindemittel durch den inerten Zusatzstoff Kalksteinmehl führt zu einer deutlichen Erniedrigung der Schwindwerte. Bis auf die Mischung mit 30 % CL 80 im Bindemittel bleiben alle Mörtel unter Quell- bzw. Schwindwerten von $\pm 0,05$ mm/m. Tendenziell wurde das Schwinden bei allen Mischungen durch Zugabe von Kalksteinmehl fast auf ein Zehntel reduziert.

5.4.5 Fazit

Bindemittelgemische auf Anhydrit-Basis scheinen aufgrund einer höheren Wasserresistenz gegenüber den Halbhydraten geeigneter für den Einsatz in wasserresistenten Gipsmörteln. Der hier verwendete REA-Anhydrit besitzt einen höheren Rehydratationsgrad als der eingesetzte Naturanhydrit. Die Wasserresistenz und das Quellverhalten bei feuchter Lagerung ist aus

diesem Grunde besser als beim Naturanhydrit. Generell kann jedoch auch Naturanhydrit verwendet werden.

Durch Zusatz des Bindemittels Kalk (CL 80, HL 2) können die relativ hohen Festigkeiten der reinen Gipspasten gesenkt werden, die Wasserresistenz wird schon bei geringer Zugabe von Weißkalkhydrat (5 M.-%) deutlich verbessert. Anhydrit/Kalk-Mischungen zeigen im Vergleich zu den reinen Calciumsulfaten erhöhte Schwindwerte (vor allem bei CL 80). Mehr als 30 M.-% Kalk sollten daher nicht eingesetzt werden.

Ein Einsatz von Zementen in wasserresistenten Gipsmörteln ist trotz einiger positiver Eigenschaften nicht zu empfehlen. Zwar kann auch bei Einsatz geringer Mengen Zement (10 M.-%) die „Löslichkeit“ dieser Gipspasten im Vergleich zu den reinen Gipsen erhöht werden, Treibreaktionen führen jedoch bei ständiger Durchfeuchtung zu einer starken Schädigung der Prüfkörper.

Latent hydraulische Zusatzstoffe wie z.B. Hüttensand können eingesetzt werden, um hohe Schwindwerte zu reduzieren.

Gemagerte Rezepturen, wie solche mit Kalksteinmehl, entsprechen in ihren Festmörtel-eigenschaften recht gut den im Anforderungsprofil festgelegten Werten. Die Verarbeitungseigenschaften dieser Mischungen sind jedoch nicht optimal. Eine gewisse „Klebrigkeit“ der Frischmörtel, mangelndes Wasserrückhaltevermögen (< 88 %) bei stark saugenden Steinen und ein ebenfalls mangelndes „Standvermögen“ bei einem Einsatz als Mauermörtel wurden festgestellt.

Der Einfluß unterschiedlicher Zuschläge mit geeignetem Kornaufbau wurde daher im weiteren untersucht.

5.5 Einsatz von Zuschlag

Bei den Untersuchungen an historischen Gipsmörteln wurden nur geringste Mengen von „säureunlöslichem“ Zuschlag gefunden (Lichtmikroskopie, chem. Analyse, vgl. Kap. 3.2). Eine gezielte Zugabe von Zuschlag fand bei der Herstellung der Gipsmörtel nicht statt. Es finden sich in den historischen Gipsmörteln herstellungsbedingt jedoch beträchtliche Mengen an Grobkorn, mit Korngrößen bis zu 6 mm [LUCAS 92 / 95].

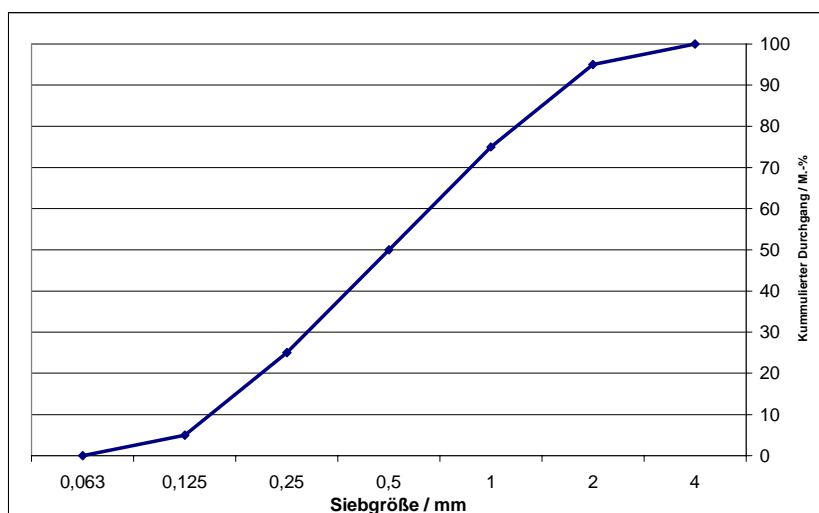
Diese Grobkörner zeichnen sich durch einen sehr guten Verbund mit der feineren Gipsmatrix aus. Dieser gute Haftverbund zwischen Grobkorn und bindenden Feianteilen wird u.a. als Ursache für die Dauerhaftigkeit historischer Gipsmörtel genannt.

Der Einsatz von Anhydrit- und Gipsstein als Zuschlag wurde daher an Bindemittelrezepturen, die sich im Vorfeld als günstig für eine weitere Anpassung an das Anforderungsprofil erwiesen hatten (Kapitel 5.4), untersucht.

Zum Vergleich wurden weitere Mischungen mit Kalksteinbrechsand geprüft.

Anhydrit- (A) und Gipsstein (G) wurden in Korngrößen von ca. 60 mm angeliefert und weiter mit einem Backenbrecher zerkleinert, um die in Abbildung 56 dargestellte Sieblinie (Körnung 0/2a nach DIN 4226-1: 04.83) zu erhalten. Der Kalkstein (K) war bereits vorgebrochen und wurde nach Siebung auf diese Sieblinie gebracht.

Abbildung 56: Sieblinie der eingesetzten Zuschläge



Die Sieblinie entspricht der Fuller-Gleichung für gebrochenen Zuschlag und besitzt einen stetigen Kornaufbau. Dies bedingt ein dichtes, hohlraumarmes Haufwerk. Ein günstiger

Kornaufbau reduziert die Mengen an Bindemittel und Wasser, die zur Verarbeitung und zur Erzielung bestimmter Festigkeiten notwendig sind [SCHOLZ].

Der Bindemittelanteil der Mörtel bestand zu 75 M.-% aus Thermoanhydrit (TA) und zu 25 M.-% aus Kalk (CL 80 bzw. HL 2). Das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis betrug 1:1 in Gewichtsteilen. Die Mörtel wurden auf ein Ausbreitmaß von $13,5 \pm 0,5$ cm eingestellt. Die Rezepturen wurden wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben hergestellt.

In Vorversuchen wurde die Verarbeitbarkeit über die Zugabe von Anreger (Kaliumsulfat) und Verzögerer (L(+)-Weinsäure) so eingestellt, daß die Mörtel mindestens zwei Stunden verarbeitbar waren, das Versteifungsende aber am nächsten Tag erreicht war. Verzögerer wurde daher den Rezepturen zugesetzt, die Anhydrit- und Gipsbrechsand enthielten. Vor allem die Feianteile dieser Zuschläge ($< 0,063$ mm) können als Anreger auf die Reaktion Anhydrit-Gips wirken [vgl. BENZ]. Den Mischungen mit Anhydrit- und Kalksteinbrechsand wurde Kaliumsulfat als Anreger hinzugegeben.

Folgende Rezepturen wurden untersucht:

Mischungen mit Weißkalkhydrat (CL 80)

37,5 % Thermoanhydrit, 12,5 % CL 80, 50 % Anhydritbrechsand \Rightarrow TCA
(0,45 M.-% Anreger, 0,0225 M.-% Verzögerer bezogen auf Anhydrit)

37,5 % Thermoanhydrit, 12,5 % CL 80, 50 % Gipsbrechsand \Rightarrow TCG
(0,045 M.-% Verzögerer bezogen auf Anhydrit)

37,5 % Thermoanhydrit, 12,5 % CL 80, 50 % Kalksteinbrechsand \Rightarrow TCK
(0,45 M.-% Anreger, bezogen auf Anhydrit)

Mischungen mit hydraulischem Kalk (HL 2)

37,5 % Thermoanhydrit, 12,5 % HL 2, 50 % Anhydritbrechsand \Rightarrow THA
(0,45 M.-% Anreger, 0,015 M.-% Verzögerer bezogen auf Anhydrit)

37,5 % Thermoanhydrit, 12,5 % HL 2, 50 % Gipsbrechsand \Rightarrow THG
(0,0375 M.-% Verzögerer bezogen auf Anhydrit)

37,5 % Thermoanhydrit, 12,5 % HL 2, 50 % Kalksteinbrechsand \Rightarrow THK
(0,45 M.-% Anreger bezogen auf Anhydrit)

5.5.1 Frischmörtelkennwerte

Ausgewählte Frischmörtelkennwerte der o.g. Gipsmörtel zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8: Frischmörtelkennwerte gemagerter Gipsmörtel

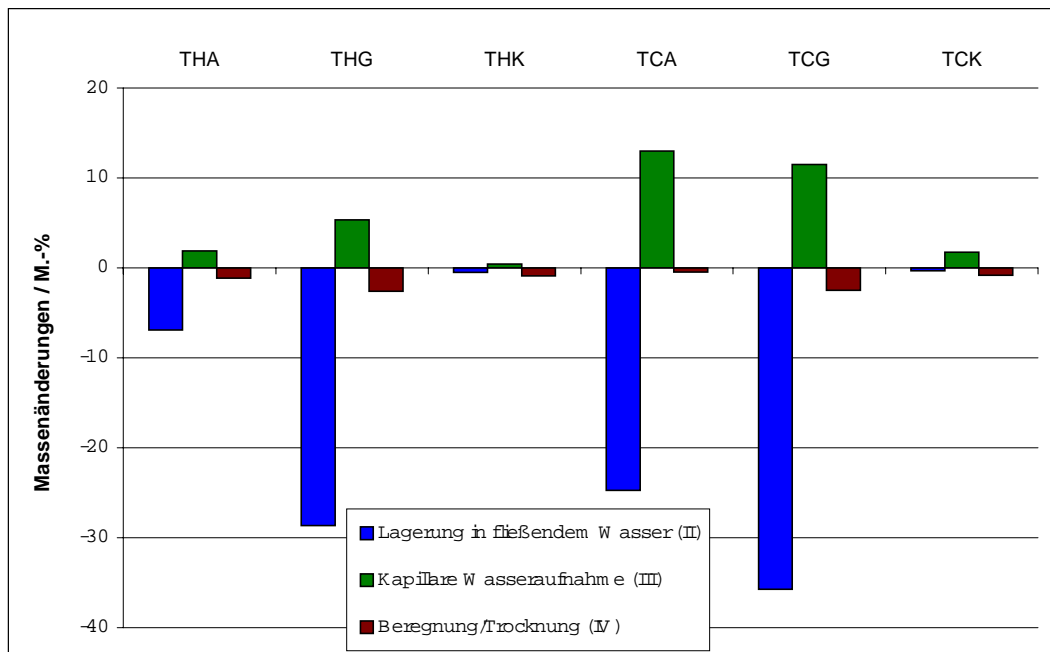
Mischung	W/T-Wert [-]	VB [min]	WRV [%]
THA	0,34	155	94,4
THG	0,38	125	94,3
THK	0,34	205	94,9
TCA	0,35	135	93,6
TCG	0,39	120	93,6
TCK	0,36	195	94,5

Mit W/T-Werten von 0,38 bzw. 0,39 weisen die Mischungen mit Gips als Zuschlag den größten Wasserbedarf auf. Der Wasseranspruch der Mischungen mit Anhydrit bzw. Kalkstein als Zuschlag ist annähernd gleich. Die Wahl des Bindemittels hat nur einen geringen Einfluß auf den Wasser/Bindemittel-Wert, bei der Verwendung von Weißkalkhydrat (CL 80) sind die Werte jedoch leicht erhöht (vgl. Kapitel 5.4.1). Das Wasserrückhaltevermögen ist mit über 90 % als ausreichend zu bewerten, wenn der Mörtel zusammen mit stark saugenden Mauersteinen, wie z.B. historischem Ziegelmaterial, eingesetzt werden soll (KNÖFEL).

5.5.2 Massenänderungen

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, wurden die Massenänderungen der Proben während der Vorlagerung bzw. während der entsprechenden Lagerungen zur Untersuchung der Wasserresistenz verfolgt. Um deutliche Effekte zu erzielen, wurden die Lagerungen auf eine Dauer von 56 d ausgedehnt (vgl. Kap. 2.5.1.2). Die folgende Abbildung 57 zeigt den Masseverlust bzw. die Massenzunahme nach 90 Tagen, also nach Beendigung der Lagerungen zur Untersuchung der Wasserresistenz.

Abbildung 57: Massenänderungen ausgesuchter Gipsmörtel während unterschiedlicher Lagerungen nach 90 d

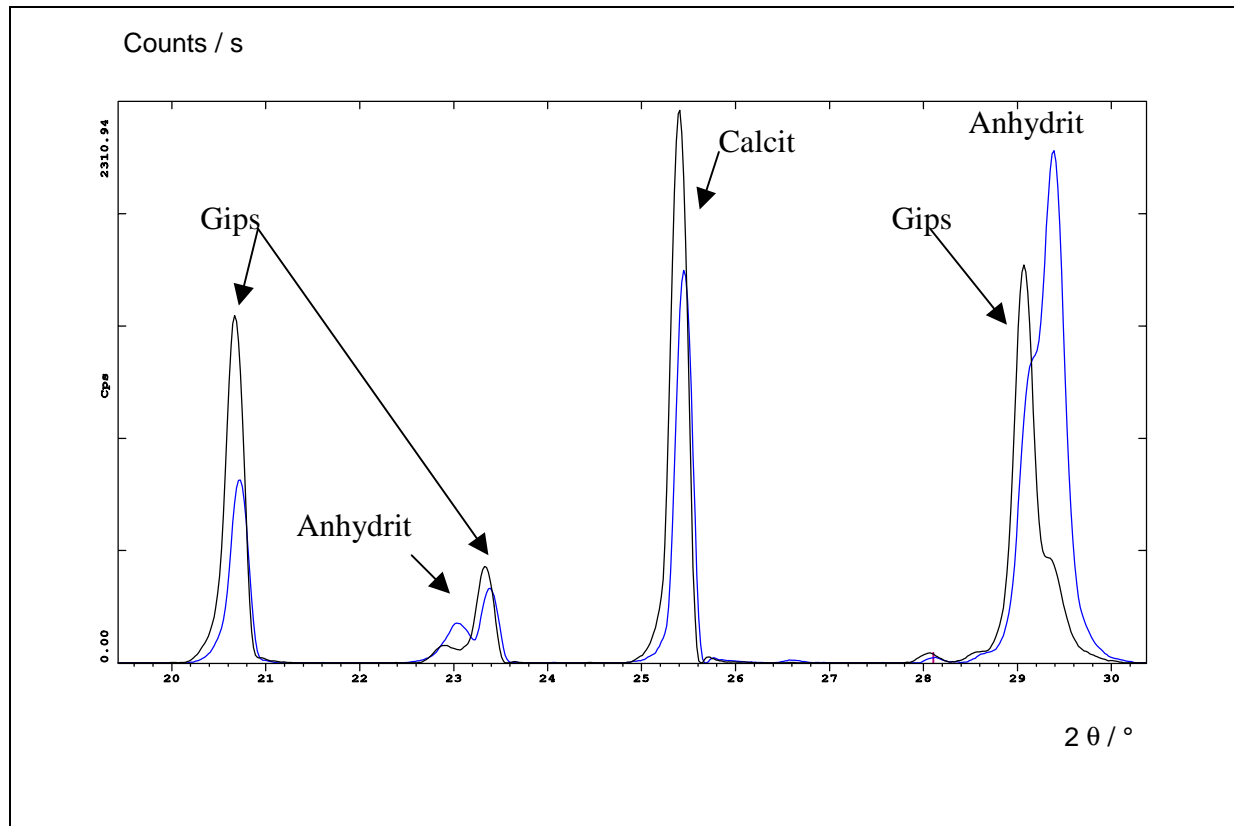


Die Lagerung in fließendem Wasser verursacht auch hier die stärksten Massenverluste. Der ständige Kontakt mit Wasser, verstärkt durch einen leichten mechanischen Abrieb durch das fließende Wasser hat Massenverluste von bis zu 35 % zur Folge. Während die Mischungen mit Kalkstein bei allen drei Lagerungen nur geringfügig angegriffen werden (Masseverlust < 1 M.-%), zeigen die Mischungen mit Anhydrit- und Gipsstein deutliche Massenverluste bei Beregnung und Lagerung in fließendem Wasser. Bei diesen Methoden steht der Schadensmechanismus des „Lösen“ im Vordergrund. Eine ständige kapillare Wasseraufnahme führt bei den Mischungen THG, TCA und TCG zu einer Massenzunahme. Wie anhand der Röntgenbeugung festgestellt werden kann, läßt sich bei den genannten Mischungen unter diesen Lagerungsbedingungen eine fortschreitende Carbonatisierung beobachten (Abbildung 58), die wahrscheinlich für diese Massenzunahme verantwortlich ist. Eine Hydratation Anhydrit-Gips kann ebenfalls zu einer Massenzunahme führen.

Die Wasserresistenz der Mischungen mit hydraulischem Kalk ist deutlich höher als die der Mischungen mit CL 80.

Die in Abbildung 57 gezeigten Effekte sind tendenziell auch bereits nach kürzerer Lagerungsdauer (28 bzw. 56 d) erkennbar, verstärken sich aber mit der Zeit.

Abbildung 58: Röntgendiffraktogramme der Mischung TCG nach trockener Lagerung bei 23/50 (blaue Linie) und nach Prüfung der Wasserresistenz nach Verfahren II – Lagerung in fl. Wasser (schwarze Linie)



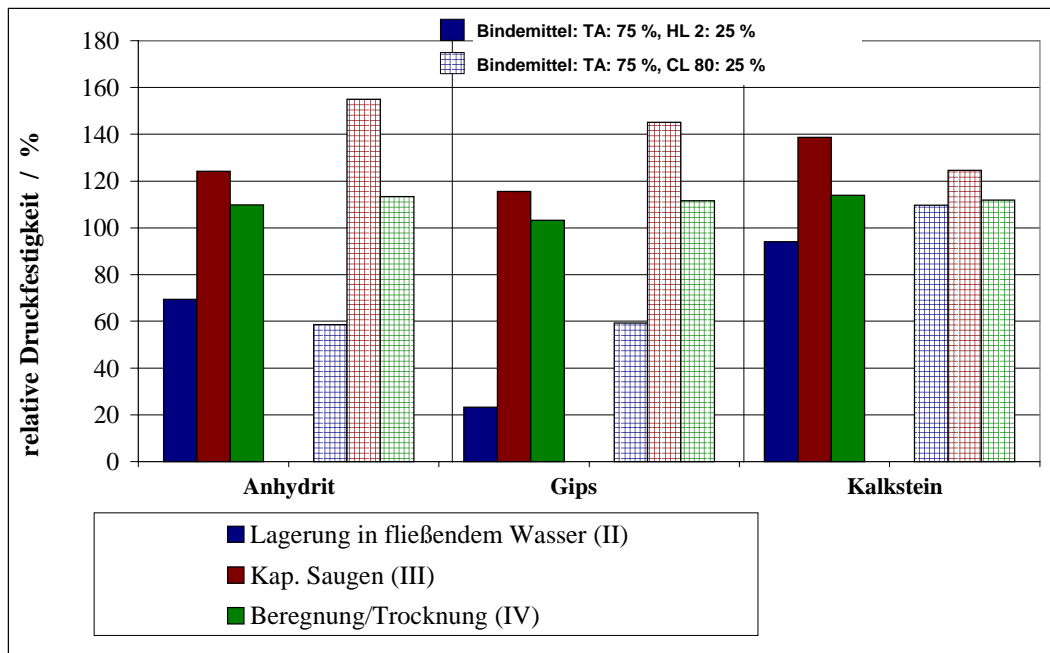
5.5.3 Mechanische Kennwerte

E-Modul, Biegezug- und Druckfestigkeiten der Mischungen wurden im Anschluß an die 28-tägige Vorlagerung, sowie nach einer Gesamtlagerungsdauer von 56 bzw. 90 d ermittelt.

Die Festigkeiten und auch die dynamischen E-Moduln der untersuchten Mischungen liegen deutlich über den im Anforderungsprofil genannten Werten ($< 20 \text{ N/mm}^2$ bzw. $< 10 \text{ kN/mm}^2$). Besonders hoch sind die Festigkeiten und E-Moduln bei Mischungen mit Kalksteinbrechsand als Zuschlag. Ebenfalls relativ hohe Festigkeiten weisen die Mischungen mit hydraulischem Kalk im Bindemittel auf ($45 - 60 \text{ N/mm}^2$). Eine Übersicht über diese Kennwerte zeigt Tabelle A 16 im Anhang.

Bei der Untersuchung der Wasserresistenz zeigen sich weitere Unterschiede der Mischungen in der Entwicklung der mechanischen Kennwerte. Abbildung 59 zeigt dies beispielhaft für die Entwicklung der Druckfestigkeiten. Dargestellt sind die relativen Druckfestigkeiten der Mischungen nach 56-tägiger Lagerung zur Untersuchung der Wasserresistenz (Methoden II, III und IV, vgl. Kap. 2.5.1.2), bezogen auf die nach der 28-tägigen Vorlagerung gemessenen Druckfestigkeiten.

Abbildung 59: Relative Druckfestigkeiten gemagerter Gipsmörtel nach Untersuchung der Wasserresistenz (Gesamtlagerungsdauer 90 d: 28 d Vorlagerung, 56 d Hauptlagerung), normiert auf die Vorlagerung



Bei den mit Kalksteinbrechsand gemagerten Proben führt eine Feuchtlagerung nahezu immer zu einer Zunahme der Festigkeiten (Ausnahme: Mischung mit HL 2 - Lagerung II). Dieser Festigkeitszuwachs ist deutlicher bei den Proben, die ständiger Feuchte (Methode II und III) ausgesetzt waren. Die Mischungen mit Kalksteinzuschlag erreichen unabhängig von der Art des eingesetzten Kalkes absolut sehr hohe Festigkeiten von 50 – 65 N/mm² (vgl. Tabelle A 16). Bei den Mischungen mit Anhydrit und Gips hat die Lagerung einen größeren Einfluß auf die Festigkeiten. Deutlich erkennbar führt eine ständige Durchfeuchtung durch kapillares Saugen bei allen Mischungen mit diesen Zuschlägen zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit. Während die Festigkeiten der Mischungen mit hydraulischem Kalk (**THA**, **THG**) bei einer solchen Lagerung nur um ca. 5-10 % steigen, steigen die Druckfestigkeiten der Mischungen mit CL 80 nahezu auf das Doppelte.

Daß diese Veränderung vermutlich mit Gefüge-änderungen aufgrund von Kristallisationsprozessen verbunden ist, zeigt Abbildung 63. Bei Untersuchung der Druckfestigkeiten nach 90-tägiger Gesamtlagerung (28 d Vorlagerung, 56 d Lagerung III) zeigten sich deutliche Unterschiede innerhalb der zwei geprüften Prismenhälften. Aufgrund der Probenanordnung (Abbildung 60) kommt es in der Kontaktzone mit Wasser zu sichtbaren Lösungserscheinungen (Abbildung 61).

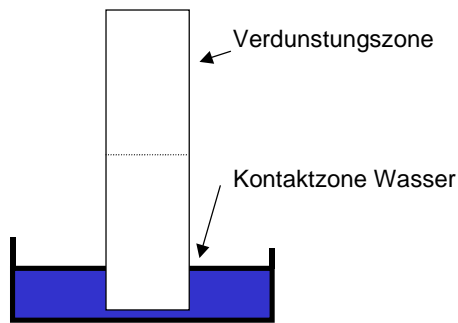


Abbildung 60:
Schema Probenanordnung Lagerung III

Das gelöste Material wird durch Kapillartransport in die Verdunstungszone des Mörtels transportiert und kann bei entsprechenden Bedingungen dort wieder auskristallisieren. Ein erhöhter Anteil an Gips in dieser Zone konnte mittels Röntgenbeugungsanalyse nachgewiesen werden (Abbildung A 12). Dies führt zu einer Verdichtung innerhalb der Verdunstungszone und damit zu einer Erhöhung der Festigkeiten (siehe Abbildung 63). Für die reinen Bindemittelpasten wurde eine solche Verdichtung innerhalb der Verdunstungszone mittels Hg-Druckporosimetrie nachgewiesen (vgl. Kap. 4.2.5, Abbildung 27).

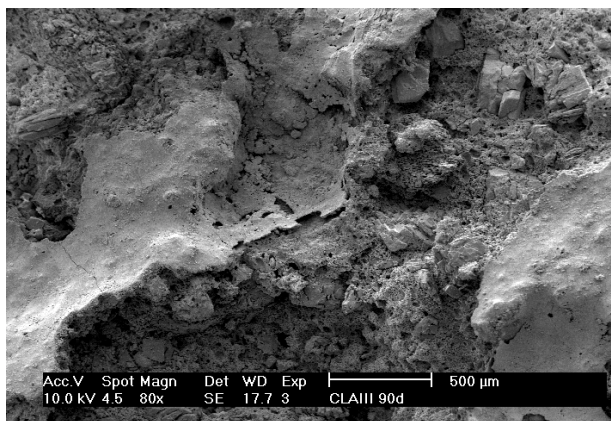


Abbildung 61:
REM-Aufnahme der Mischung TCA nach Abschluß der Lagerung III, partielle Auflösung der rel. dichten Oberflächenschicht („Kruste“)

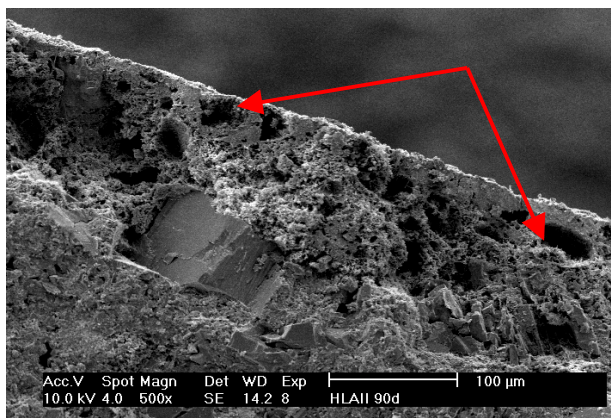
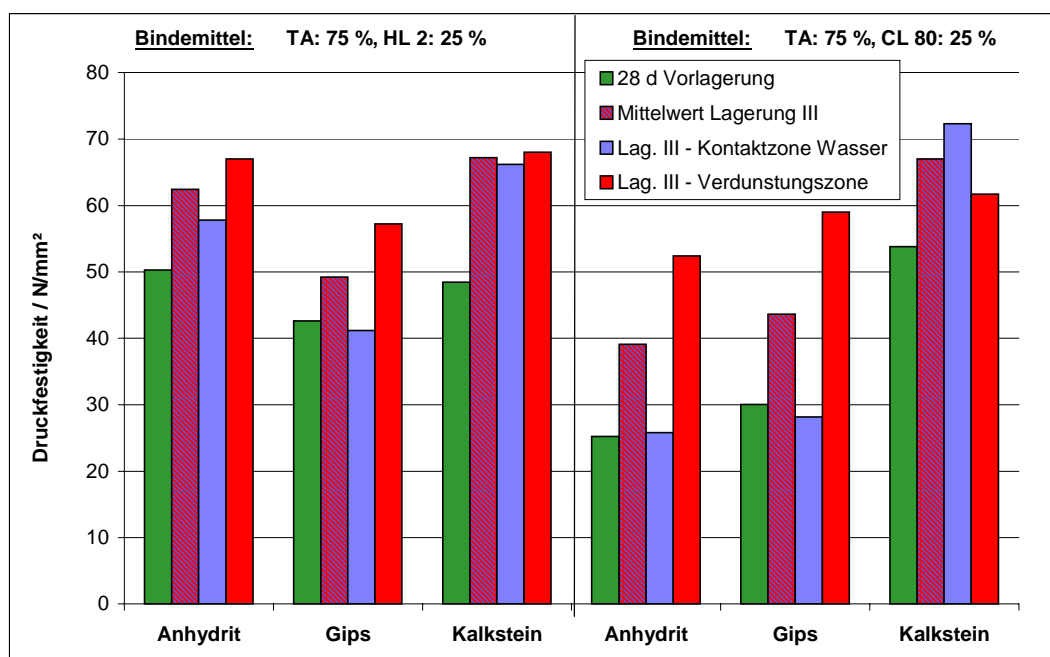


Abbildung 62:
REM-Aufnahme der Mischung THA nach Abschluß der Lagerung II, Lösungerscheinungen im äußeren Randbereich der Probekörper

Abbildung 63: Druckfestigkeiten der gemagerten Gipsmörtel nach 28-tägiger Vorlagerung sowie nach Abschluss der Lagerung III (Kap. Saugen, Probenalter 90 d)



Besonders deutlich erkennbar ist dieser Effekt bei den Mischungen, die Anhydrit und Gips als Zuschlag enthalten. Die absolut feststellbare Zunahme der Druckfestigkeit ist hier nahezu vollständig auf den Festigkeitszuwachs in der Verdunstungszone zurückzuführen.

Die Beregnung der Prismen bewirkt tendenziell eine Zunahme der Festigkeiten im Vergleich zu gleich alten, trocken gelagerten Proben. Ausgeprägter ist dies bei den Mischungen, die im Bindemittel Weißkalkhydrat und als Zuschlag Anhydrit bzw. Gips enthalten. Die wechselnde Durchfeuchtung und Trocknung fördert bei diesen Proben eine Carbonatisierung und begünstigt eine weitere Umsetzung noch vorhandenen Anhydrits zum Gips.

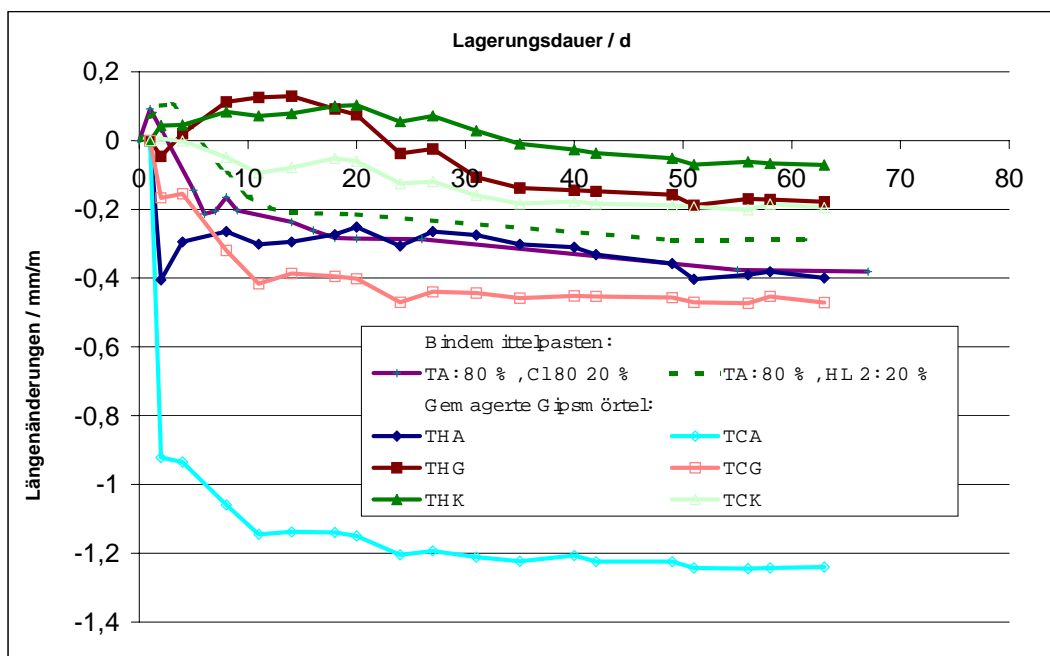
Die Lagerung in fließendem Wasser führt bei den Proben, die sulfatisches Material als Zuschlag enthalten, zu deutlichen Festigkeitseinbußen (Abbildung 62). Wurde Gips als Zuschlag verwendet, ist dieser Festigkeitsverlust besonders groß (bis zu 20% der ursprünglichen Werte bei Verwendung von HL 2 im Bindemittel). Ursächlich für diese Festigkeitseinbußen ist vermutlich eine beginnende Auflösung der Gips- bzw. Anhydritkristalle des Zuschlags sowie des verwendeten Bindemittels. Die Rezepturen mit Weißkalkhydrat (CL 80) zeigen bei dieser Lagerung tendenziell eine bessere Wasserresistenz als vergleichbare Mischungen mit hydraul. Kalk (HL 2).

Die Entwicklung der E-Moduln und Biegezugfestigkeiten während der unterschiedlichen Feucht- bzw. Wechsellagerungen verläuft in vergleichbaren Tendenzen.

5.5.4 Hygrische Kennwerte

Ein relativ geringes Quellen/Schwinden der Mörtel unter Praxisbedingungen ist Voraussetzung für einen Einsatz als Mauermörtel. Die Längenänderungen der gemagerten Gipsmörtel wurden daher während 28-tägiger Vorlagerung und den weiteren Hauptlagerungen zur Untersuchung der Wasserresistenz verfolgt. Das Dehnungsverhalten der Rezepturen bei trockener Lagerung (28 d Vorlagerung, dann Lagerung bei 23/50) zeigt die Abbildung 64. Bei Betrachtung der Quell-/Schwindvorgänge während dieser Zeit fällt vor allem die Mischung mit Weißkalkhydrat und Anhydritzuschlag (TCA) auf. In den ersten 10 Tagen zeigt diese Mischung ein starkes Schwinden auf Werte von -1,1 mm/m. Bei allen Mischungen mit CL 80 kann ein Schwinden beobachtet werden, welches jedoch bei den Zuschlägen Gips (-0,4 mm/m) und Kalkstein (-0,19 mm/m) weniger stark ausfällt. Generell ist die Reaktion von Anhydrit und Wasser zum Gips mit einer Volumenabnahme verbunden (Anhydrit + Wasser: 177 Raumteile, Gips: 160 Raumteile; OTTEMANN). Wird diese Reaktion zusätzlich angeregt, kann dies möglicherweise, wie z.B. bei Mischung TCA, zu einem deutlichen Schwinden der Gipsmörtel führen.

Abbildung 64: Quellen/Schwinden nach 28-tägiger Vorlagerung und anschließender Lagerung bei 23/50



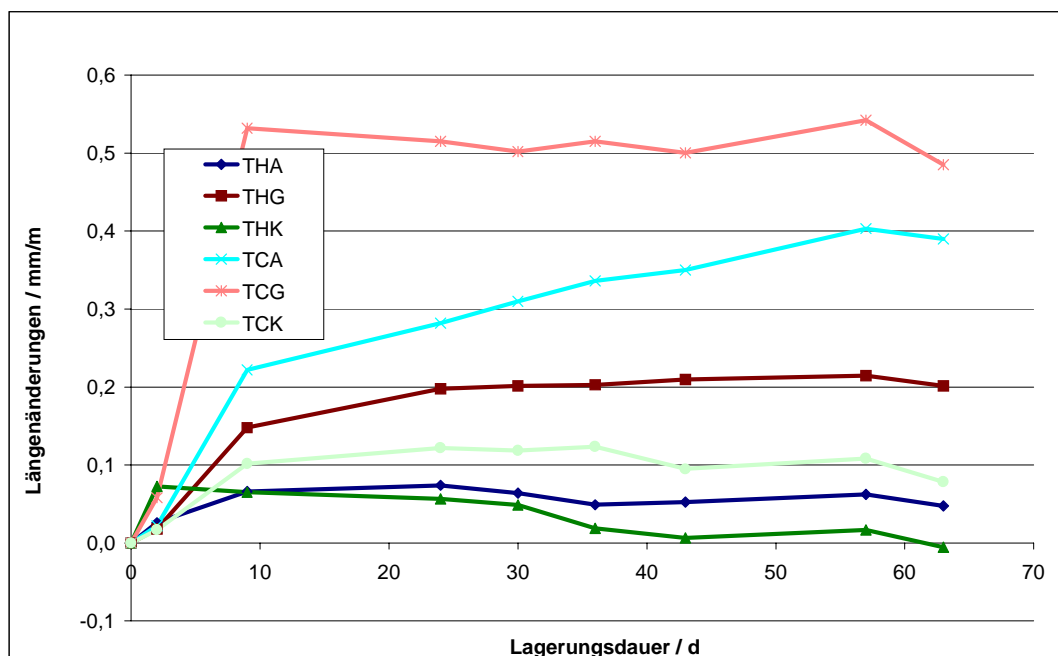
Die Längenänderungen der Proben mit hydraulischem Kalk sind insgesamt geringer, zeigen jedoch in Bezug auf die Art des Zuschlags dieselben Tendenzen wie die Gipsmörtel mit CL 80. Die Mischungen THG und THK quellen während der Vorlagerung zunächst, schwinden dann jedoch auf Werte von bis zu -0,18 mm/m. Abgesehen von Mischung TCA sind die

Längenänderungen jedoch nicht so gravierend, daß ein Einsatz als Fugenmörtel unmöglich wäre.

Zur Untersuchung der Wasserresistenz der Proben wurden die Eigenschaftsänderungen bei weiteren Lagerungen (Kapillares Saugen (III), Beregnung/Trocknung (IV)) untersucht. Starke Quellprozesse, die auf eine Schädigung der Proben durch diese Feucht- bzw. Wechsellagerungen hinweisen, konnten jedoch nicht beobachtet werden.

Bei keiner der oben beschriebenen Rezepturen führte eine Beregnung/Trocknung zu einem dauerhaften Quellen der Probekörper. Die Wasseraufnahme während der Beregnung verursacht jedoch bei allen Mischungen ein reversibles Quellen, das in etwa mit der Wasseraufnahme der Mörtel korreliert (vgl. Tabelle 9). Das heißt: je größer die Wasseraufnahme der Mischung ist, um so größer sind die gemessenen Quellwerte. Das Quellen durch Wasseraufnahme kann bis zu 0,30 mm/m betragen (Mischung TCA). Eine Änderung dieses Verhaltens, etwa durch eine Verdichtung des Mörtelgefüges, konnte nicht festgestellt werden. Bei Trocknung im Anschluß an die Beregnung werden die Ausgangswerte vor Beregnung wieder erreicht bzw. sogar unterschritten.

Abbildung 65: Längenänderungen bei ständiger Wasseraufnahme durch kap. Saugen – Verfahren III (Probenalter bei Start der Messungen: 28 d (Vorlagerung))



Ähnliche Tendenzen lassen sich bei einer ständigen Wasseraufnahme der Mörtel durch kapillares Saugen feststellen (Abbildung 65). Auch hier zeigen die Rezepturen mit hohen Wasseraufnahmekoeffizienten und Porositäten das stärkste Quellen. Es werden Werte von bis zu 0,54 mm/m (Mischung TCG) erreicht. Bei fast allen Mischungen ist das Maximum bereits

nach kurzer Zeit erreicht, ein weiteres Quellen findet dann nicht mehr, oder nur sehr langsam, statt. Das weist darauf hin, daß es sich hier vorwiegend ebenfalls um ein Quellen bedingt durch Wasseraufnahme handelt. Lediglich bei der Mischung mit Weißkalkhydrat und Anhydrit-Zuschlag ist mit zunehmender Lagerungsdauer ein weiteres Quellen zu beobachten. Hier kommt es möglicherweise zu einer oberflächlichen Hydratation der größeren Anteile des Anhydritzuschlags zu Gips, die in Gegenwart von Calciumhydroxid angeregt wird.

Die Wasseraufnahme der Mörtel wurde nach dem in Kapitel 2.3.5 beschriebenen Verfahren untersucht. Die Ergebnisse beschreibt Tabelle 9.

Tabelle 9: Wasseraufnahmekoeffizient (ω), volumenbezogener Wasseraufnahmegrad (W_V)

Mischung	ω [kg/m ² √h]	W_V [Vol.-%]
THA	0,44	4,32
THG	2,87	8,01
THK	1,03	5,80
TCA	11,42	13,50
TCG	9,98	14,07
TCK	1,63	7,11

Es zeigt sich, daß die Wasseraufnahme bei den Mischungen mit Weißkalkhydrat deutlich schneller verläuft, als bei vergleichbaren Mischungen mit hydraulischem Kalk. Die Wasseraufnahmekoeffizienten sind bei diesen Mischungen etwa 3-mal so groß, es werden Werte von 1,6 bis zu 11,4 kg/m²*h erreicht. Sie sind damit etwas höher als die Kennwerte, die bei Untersuchung historischer Gipsmörtel gefunden wurden (vgl. Tabelle 4). Auffallend niedrige Wasseraufnahmekoeffizienten und Wasseraufnahmegrade besitzen die Mischungen mit Kalksteinbrechsand.

5.5.5 Andere Bindemittel/Zuschlag-Kombinationen

Die in Kapitel 5.5 beschriebenen Mischungen mit Kalkstein entsprechen bezüglich der Wasserresistenz, dem Quell- bzw. Schwindverhalten und anderen Eigenschaften bereits weitestgehend dem in Abschnitt 5 genannten Anforderungsprofil. Lediglich die Festigkeiten und E-Moduln dieser Mischungen sind im Vergleich mit historischen Gipsmörteln noch zu hoch.

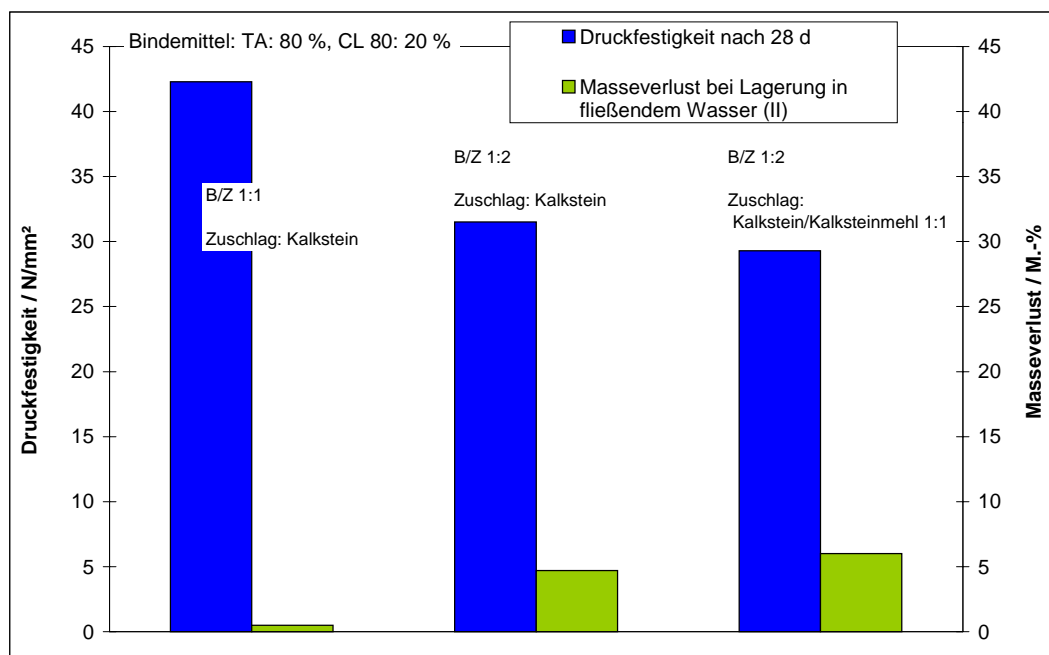
Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde daher der Einfluß des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses auf diese technologischen Eigenschaften geprüft.

Als Bindemittelrezeptur wurde eine Mischung mit 80 M.-% Thermoanhydrit und 20 M.-% CL 80 ausgewählt. Diese wurde mit Kalksteinbrechsand der in Kapitel 5.5 genannten Sieblinie im Verhältnis 1:1 bzw. 1:2 gemagert. Eine weitere Rezeptur wurde mit einem Gemisch aus Kalksteinbrechsand und Kalksteinmehl (50 M.-% K, 50 M.-% Kstm) gemagert, ebenfalls im Verhältnis 1:2.

Die Trockenmörtel wurden wie in Kapitel 2.2 beschrieben hergestellt, auf ein Ausbreitmaß von $13,5 \pm 1,0$ cm eingestellt und den entsprechenden Lagerungen unterzogen. Der Thermoanhydrit wurde mit 1,0 M.-% Calciumsulfat-Dihydrat angeregt. Frischmörtelkennwerte dieser Mörtel sowie weitere technologische Eigenschaften zeigt Tabelle A 17 im Anhang.

Wie Abbildung 66 zeigt, können die Festigkeiten durch eine Senkung des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses nur leicht gemindert werden. Auch bei einem teilweisen Ersatz des Kalksteinbrechsandes durch feingemahlenes Kalksteinmehl (hoher Wasseranspruch) sinkt die Druckfestigkeit nur auf 70 % des Ausgangswertes und liegt damit immer noch leicht über den im Anforderungsprofil geforderten Werten. Gleichzeitig ist eine geringfügige Verschlechterung der Wasserresistenz bei Erhöhung des Anteils an Zuschlag zu beobachten. Dies läßt sich wohl durch einen mangelnden Verbund zwischen den Dihydratkristallen erklären. Die Grenzfläche Zuschlag-Bindemittel stellt zudem eine Schwachstelle dar, die den Wassertransport im Mörtel erleichtert.

Abbildung 66: Druckfestigkeit nach 28 d und Masseverlust bei Lagerung in fließendem Wasser von gemagerten Gips-Kalk-Mörteln auf Basis TA



Die Wasserresistenz dieser weiter gemagerten Mischungen ist jedoch noch ausreichend für einen Einsatz dieser Mörtel im Außenbereich.

Weitere Versuche mit Anhydritzuschlag in Kombination mit Kalksteinmehl in verschiedenen Bindemittel/Zuschlag-Verhältnissen wurden durchgeführt. Auch hier zeigte sich, daß bei einer Erhöhung des Zuschlaganteils, vor allem in Kombination mit Kalksteinmehl, die Druckfestigkeiten gesenkt werden können. Fast immer ist damit jedoch auch eine Verringerung der Wasserresistenz verbunden. Kennwerte dieser weiteren Mischungen zeigt Tabelle A 18.

5.5.6 Fazit

Die schlechte Verarbeitbarkeit reiner Bindemittelpasten auf Gipsbasis bzw. pastöser „Mörtel“ auf Gipsbasis (Kstm als Füller) läßt sich durch den Einsatz geeigneter Zuschläge deutlich verbessern. Auch eine Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens wird dadurch erreicht.

Mörtel mit Kalksteinbrechsand-Zuschlag zeigten bei allen Lagerungen die besten Eigenschaften. Auch Mörtel mit Anhydritbrechsand scheinen bedingt geeignet für einen Einsatz im Außenbereich. Sie bergen jedoch die Gefahr einer verspäteten Hydratation des Anhydrits, damit verbundenen Quellprozessen und möglicherweise Gefügeschäden.

Das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis sollte nicht kleiner als 1:2 gewählt werden, da mit zunehmendem Zuschlag-Anteil der Verbund zwischen den relativ groben Gipskristallen gestört wird und mit erhöhten Masseverlusten zu rechnen ist.

5.6 Geeignete Mischungen für den Einsatz im Außenbereich

Im Rahmen des Kapitels 5 wurde der Einsatz unterschiedlicher Zusatzmittel, Zusatzstoffe und Zuschläge in Kombination mit Calciumsulfat-Bindemitteln und deren Einfluß auf die Wasserresistenz und andere Kenngrößen (WRV, Quellen/Schwinden, Festigkeiten etc.) untersucht.

Die untersuchten Zusatzmittel wirken in der Regel durch eine Verzögerung des Abbindeprozesses und eine damit einhergehende „Vergrößerung“ der Kristalle. Die Wasserresistenz konnte allein durch diese Zusatzmittel nur geringfügig verbessert werden. Wird die Reaktion zum Gips jedoch zu stark verzögert (z.B. bei Anhydrit als Ausgangsstoff), kann durchaus auch eine Verschlechterung eintreten.

Hydraulische Zusätze (Kalke, Zemente) bzw. solche die ggf. hydraulisch reagieren können (latent hydraulische Stoffe: Hüttensand, Puzzolane: Microsilica) hatten fast immer einen positiven Effekt auf die Wasserresistenz der Gipspasten. Als Zuschlag für solche dauerhaften Gipsmörtel war von den untersuchten Sanden Kalkstein am besten geeignet.

Als günstigste Mischungen stellten sich Bindemittelrezepturen basierend auf Thermoanhydrit und < 30 M.-% CL 80 heraus, die mit Kalksteinbrechsand im Verhältnis 1:1 gemagert wurden. Eine ausreichende Anregung des Anhydrits z.B. durch Kaliumsulfat oder Gips ist erforderlich, da ansonsten erhöhte Schwindwerte auftreten. Diese Rezepturen zeigen eine breite Übereinstimmung mit dem Anforderungsprofil.

Auch weitere Kombinationen führten zum Ziel und könnten je nach Objekt ggf. eingesetzt werden.

So können als Kalke ohne weiteres auch ein HL 2 bzw. ein CL 90 in Gehalten < 30 M.-% (im Bindemittel) eingesetzt werden, welche die Eigenschaften der Mörtel unterschiedlich beeinflussen, aber dennoch im vorgegebenen Rahmen liegen. Auch Naturanhydrit kann statt des Thermoanhydrits (REA-Anhydrit) verwendet werden. Zwar zeigt dieser aufgrund eines geringeren Rehydratationsgrades bei ständiger Feuchteeinwirkung ein stärkeres Quellen, zu einer Zerstörung des Gefüges kommt es jedoch unter den Versuchsbedingungen auch bei lang andauernder Wasserlagerung nicht.

6 Objektbezogene Optimierung – Anlage von Musterflächen

Obwohl Gipsbaustoffe heute vorwiegend für den Innenausbau produziert werden und deren Einsatz im Außenbereich laut DIN 1168 auch nicht zulässig ist, besteht doch ein großer Bedarf an geeigneten Mörteln zur Sanierung der zahlreichen Gebäude, bei denen Gips im Außenbereich verarbeitet wurde.

Zwei Gebäude, bei denen in absehbarer Zeit Sanierungsmaßnahmen anstehen, sind die in Kapitel 3.1 genannten Kirchen Johannes-Servatius in Pöhlde und St. Cyriaci in Dorste.

Die dort auftretenden Schäden sowie die Eigenschaften der vorhandenen historischen Gipsmörtel wurden bereits in Kapitel 3 beschrieben. Für die Sanierung dieser Gebäude sollte bevorzugt ein Mörtel auf Gipsbasis verwendet werden.

Für diesen Zweck erfolgte eine objektbezogene weitere Optimierung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Gipsmörtel und schließlich die Applikation zweier Rezepturen an den oben genannten Kirchen.

6.1 Objektbezogene Optimierung

Für die Anlage der Musterflächen in Pöhlde und Dorste war von den Bauherren eine farbliche Anpassung der Gipsmörtel an das vorhandene historische Altmaterial gefordert worden. Die gereinigten, getrockneten Proben der Mörtel aus Dorste sind nahezu „rein-weiß“. In Pöhlde wurden zwei farblich (und auch chemisch) unterschiedliche Mörtelvarietäten gefunden. Der jüngere, wohl barocke Mörtel besitzt einen weißen Farbton, der ältere, gotische Mörtel zeigt eine deutliche Graufärbung und enthält darüber hinaus Reste verkohlten Brennmaterials.

Die farbliche Anpassung erfolgte durch die Verwendung geeigneter Ausgangsstoffe. Als Calciumsulfat-Komponente wurde Naturanhydrit (weiß) statt Thermoanhydrit (leicht beige-farben) eingesetzt. Als Kalk-Komponente wurde auf einen CL 90 (weiß) statt auf einen CL 80 (leicht grau) zurückgegriffen. Um das Aussehen des grauen Gipsmörtels der Kirche in Pöhlde nachzustellen, wurde Meilerkohle aus Buchenholz gebrochen und auf eine geeignete Sieblinie eingestellt. Die Sieblinie und die nötige Menge an Holzkohle wurde in Vorversuchen im Vergleich mit dem Originalmaterial ermittelt.

Folgende Rezepturen wurden in diesem Zusammenhang untersucht:

Bindemittel: 80 M.-% NA, 20 M.-% CL 90

Zuschlag: 100 M.-% Kalksteinbrechsand, B/Z 1:1 (in Gewichtsteilen)⇒ **NCK**

Bindemittel: 80 M.-% NA, 20 M.-% CL 90

Zuschlag: 100 M.-% Kalksteinbrechsand, B/Z 1:2 (in Gewichtsteilen)⇒ **NCK 1:2**

Bindemittel: 80 M.-% NA, 20 M.-% CL 90

Zuschlag: 50 M.-% Kalksteinbrechsand, 50 M.-% Kalksteinmehl, B/Z 1:2 (in Gewichtsteilen) ⇒ **NCKKstm 1:2**

Bindemittel: 80 M.-% NA, 20 M.-% CL 90

Zuschlag: 100 M.-% Kalksteinbrechsand, B/Z 1:1 (in Gewichtsteilen)

0,9 % Meilerkohle bezogen auf den Trockenmörtel ⇒ **NCK-0,9C**

Die Trockenmörtel wurden wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben hergestellt (Ausbreitmaß 13,5 cm) und den entsprechenden Lagerungen unterzogen. Der Naturanhydrit wurde mit 1 M.-% Calciumsulfat-Dihydrat angeregt.

Abbildung 67: Druckfestigkeit nach 28 d und Masseverlust bei Lagerung in fließendem Wasser von gemagerten Gips-Kalk-Mörteln auf Basis NA

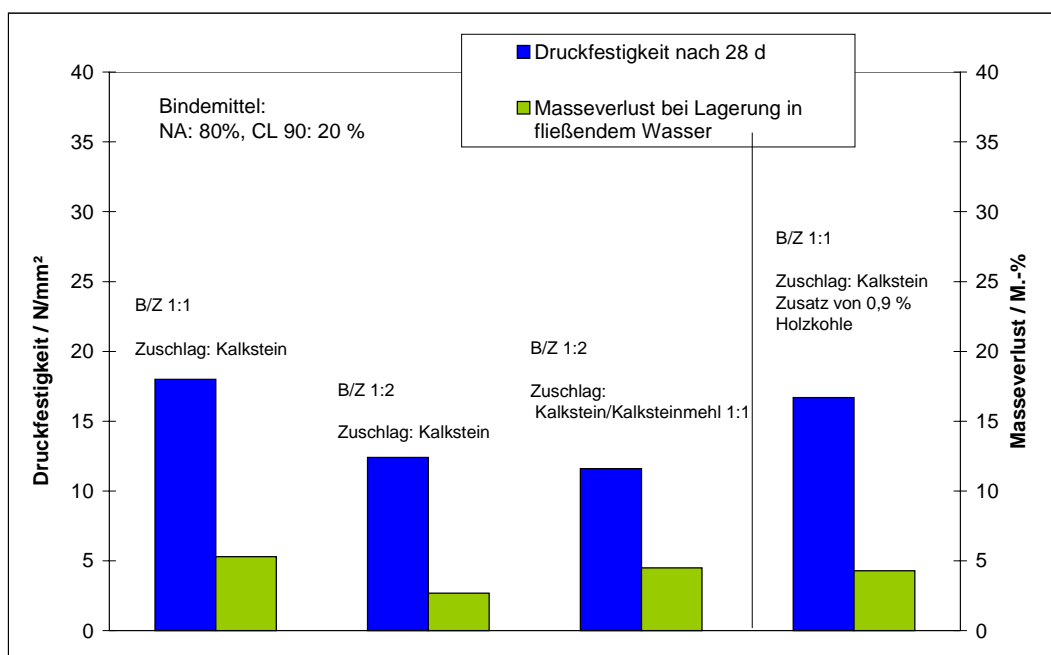


Abbildung 67 zeigt, daß Gipsmörtel auf Basis von Naturanhydrit (NA) und Luftkalk (CL 90) deutlich geringere Festigkeiten aufweisen als vergleichbare Mischungen mit thermischem Anhydrit (TA) und Weißkalkhydrat (Cl 80). Dies wurde bereits in Kapitel 5.4.1 belegt und erklärt sich durch die geringere Reaktivität/geringeren Rehydratationsgrad des Naturanhydrits. Die Festigkeiten sind höher als die Kennwerte des historischen Altmaterials (vgl. Kap. 3.3), die E-Moduln liegen jedoch auch bei einem Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis von 1:1 im Bereich der Anforderungen (vgl. Tabelle A 17).

Der Masseverlust der untersuchten Mischungen liegt bei Lagerung in fließendem Wasser (II) bei ca. 5 M.-%. Eine optische Begutachtung läßt jedoch keine größeren Lösungsschäden erkennen.

Der Einsatz von 0,9 M.-% Holzkohle hat keinen deutlichen Einfluß auf Frisch- sowie Festmörteleigenschaften (siehe Tabelle A 17 im Anhang), dies wurde in Untersuchungen bezüglich Kalkmörteln bereits nachgewiesen (DEGENKOLB). Der leicht erhöhte Wasserbedarf, der durch die Holzkohle verursacht wird, schlägt sich in leicht geringeren Festigkeiten nieder. Die Wasserresistenz ist jedoch vergleichbar.

Die oben genannten Rezepturen wurden mit 1 M.-% Calciumsulfat-Dihydrat bezogen auf den Anhydrit angeregt. Bei Prüfung der Frischmörteleigenschaften bzw. des Versteifungsbeginns zeigte sich jedoch, daß diese Mörtel für einen Einsatz in der Praxis zu schnell erstarrten (VB = 24 min). Es wurden daher Mischungen ohne Anreger sowie mit einem Zusatz von 0,015 M.-% Weinsäure bezogen auf den Anhydrit untersucht. Der Zusatz von Weinsäure erhöhte die Verarbeitbarkeitszeit auf ca. 70 min. Eine Beeinflussung der Frischmörtelkennwerte wurde darüber hinaus nicht beobachtet. Die Festigkeiten und E-Moduln wurden leicht gesenkt, die Wasserresistenz der Mischungen blieb in etwa gleich (vgl. Tabelle 10).

Die so modifizierten Gipsmörtel (Zusammensetzung – siehe unten, Kap. 6.2) entsprachen damit dem in Kapitel 5 formulierten Anforderungsprofil und wurden zur Anlage von Musterflächen an den Kirchen in Pöhlde und Dorste verwendet.

6.2 Anlage von Musterflächen

Nach einer umfassenden Untersuchung des vorhandenen Altmaterials (siehe Kap. 3.1) wurden am 12. und 13. Juli 2000 an den oben genannten Kirchen Testflächen angelegt. Neben den o.g. Mörteln wurden Gipsmörtel weiterer Institute appliziert. Die Fugenmörtel wurden als Trockenmörtel geliefert und von einer örtlichen Restaurierungsfirma verarbeitet.

In Pöhlde und Dorste wurde jeweils ein „weißer“ Mörtel der folgenden Rezeptur appliziert:

Bindemittel: 80 M.-% NA, 20 M.-% CL 90

Zuschlag: 100 M.-% Kalksteinbrechsand, B/Z 1:1 (in Gewichtsteilen)

Zusatzmittel: 0,015 M.-% Weinsäure bezogen auf Naturanhydrit

In Pöhlde wurde zusätzlich ein weiterer, grau gefärbter Mörtel der folgenden Zusammensetzung eingesetzt:

Bindemittel: 80 M.-% NA, 20 M.-% CL 90

Zuschlag: 100 M.-% Kalksteinbrechsand, B/Z 1:1 (in Gewichtsteilen)

Zusatzmittel: 0,9 M.-% Meilerkohle bezogen auf den Trockenmörtel, 0,015 M.-% Weinsäure bezogen auf Naturanhydrit

Auf die zusätzliche Zugabe von Anreger wurde aufgrund der ansonsten zu geringen Verarbeitbarkeitszeiten verzichtet.

Tabelle 10 zeigt Kennwerte der vor Ort hergestellten Frischmörtel bzw. Probekörper (Abmessungen der Probekörper wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben).

Tabelle 10: Ausgewählte Frisch- und Festmörtelkennwerte der bei der Applikation hergestellten Gipsmörtel sowie die Kennwerte der entsprechenden Labormörtel

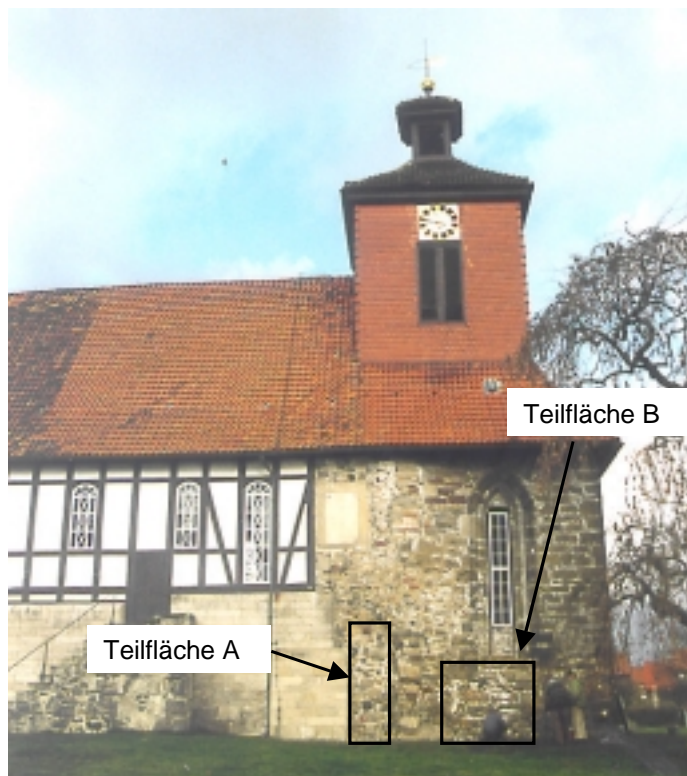
Probenbezeichnung	LP-Gehalt	Frishmörtel- rohdichte	$E_{\text{dyn}} - 28 \text{ d}$	$\beta_{\text{BZ}} - 28 \text{ d}$	$\beta_{\text{D}} - 28 \text{ d}$
	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[kN/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
<i>Vor Ort hergestellte Probekörper</i>					
Pöhlde B – weiß	3,4	2,09	12,2	3,7	12,4
Pöhlde B - grau	5,5	2,02	11,5	3,2	11,1
Dorste 1 - weiß	n.b.	n.b.	11,6	3,1	10,9
<i>Im Labor hergestellte Probekörper</i>					
Rezeptur „weiß“	3,6	2,10	12,4	3,4	11,2
Rezeptur „grau“	4,3	2,08	11,5	3,2	10,7

Da bei der Herstellung der Frishmörtel vor Ort weitestgehend mit den vorgegebenen Wassermengen gearbeitet wurde, treten nur geringfügige Unterschiede bei Frish- und Festmörtelkennwerten auf, die auf unterschiedliche Mischverfahren zurückzuführen sind (Labor: Mörtelmischer, vor Ort: Rührer bzw. von Hand).

6.2.1 Johannes Servatius-Kirche in Pöhlde

An der Johannes Servatius-Kirche in Pöhlde wurden zwei Bereiche für die musterhafte Sanierung des Mauerwerks ausgewählt. Eine Ansicht der Südseite mit den beschriebenen Musterflächen zeigt Abbildung 68.

Abbildung 68: Johannes-Servatius in Pöhlde, Südseite
- Lage der Musterflächen



Die Durchführung der Sanierung erfolgte in folgenden Schritten:

- a) Schon während der Probennahme im Februar 2000 wurde damit begonnen, zementäre Mörtel aus früheren Restaurierungsarbeiten zu entfernen, welche die ursprünglichen Gipsmörtel zum großen Teil bedeckten. Diese im Vergleich zum vorhandenen Gipsmörtel relativ dichten und festen Zementmörtel können ansonsten zu einer weiteren Schädigung des Mauerwerks führen. Eine Schädigung kann z.B. durch Ettringitbildung, aber auch durch „Staunässe“ hinter den dichteren Zementmörteln verursacht werden. Abschließende Maßnahmen wurden zum Beginn der Applikation, im Juli 2000 durchgeführt.
- b) An den für die Applikation vorgesehenen Mauerwerksbereichen wurden zementäre Mörtel bzw. Gipsmörtel auf eine Fugentiefe von 2- 4 cm ausgeräumt. In stark geschädigten Bereichen brachen dabei locker sitzende Steine aus dem Mauerwerk, besonders innerhalb der Teilfläche A, siehe Abbildung 68. Für den Aufbau der Mauerwerkskante und um fehlende Steine zu ersetzen wurde Material aus einem nahegelegenen Steinbruch verwendet. Aufgemauert wurde mit den für die Verfugung vorgesehenen Trockenmörteln.
- c) Die ausgeräumten Fugen wurden mechanisch gesäubert, vorgeätzt und mit den Trockenmörteln verfugt. Gemischt wurde vorwiegend per Hand (Handrührgerät und Kelle), nachdem der Mörtel in das vorgelegte Wasser eingestreut worden war. Nach einem Fugenglattstrich wurden die Oberflächen mit einem Schwamm vorsichtig texturiert.

Eine Detail-Ansicht der stark geschädigten Teilfläche B zeigt Abbildung 69.

Abbildung 69: Teilfläche B – vor Anlage der Musterflächen



Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen die Bereiche der Teilfläche A in denen die o.g. Mörtel appliziert wurden.



Abbildung 70:
Teilfläche B – applizierter „grauer“ Mörtel,
am Tag der Verfugung



Abbildung 71:
Teilfläche B – applizierter „weißer“
Mörtel, am Tag der Verfugung

6.2.2 St. Cyriaci in Dorste

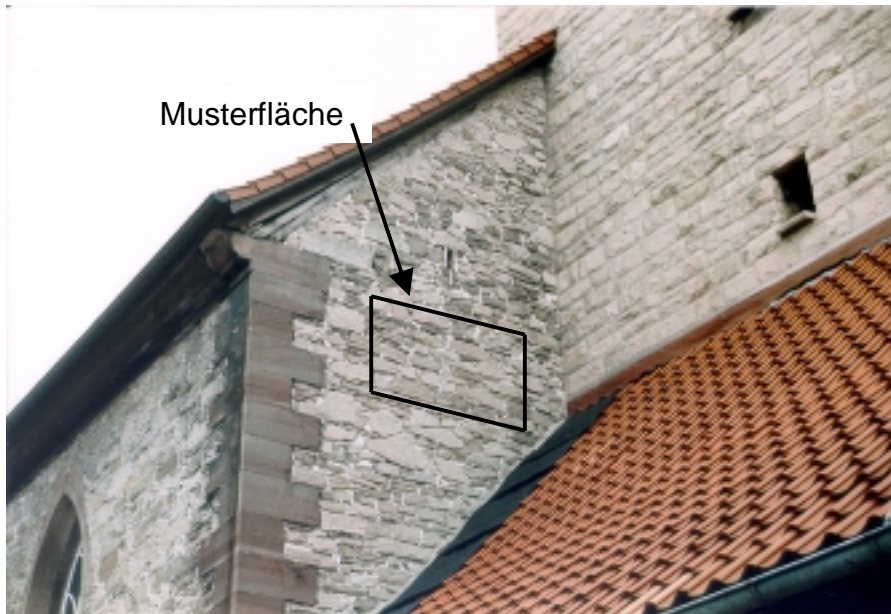
Bei Anlage der Musterfläche in Dorste wurde ähnlich vorgegangen wie bei der musterhaften Sanierung in Pöhlde. Insgesamt war das Mauerwerk im entsprechenden Bereich des Bauwerks in besserem Zustand als an der Johannes Servatius-Kirche in Pöhlde. Es wurde kein ergänzendes Steinmaterial benötigt. Die relativ schmalen Fugen wurden auf eine geeignete Tiefe ausgeräumt, gesäubert, vorgeätzt und dann mit den ebenfalls von Hand gemischten Mörteln verfugt.

Die Testfläche vor Applikation der Gipsmörtel zeigt Abbildung 72. Sie befindet sich im Giebelbereich der Nord/Westseite der Kirche, links des Turms

Verwendet wurde ein „weißer“ Mörtel nach der in Kapitel 6.2 genannten Rezeptur (siehe auch Tabelle 10).

Auch hier wurden weitere Trockenmörtel appliziert.

Abbildung 72: Lage der Fläche für die Applikation, St. Cyriaci-Westseite



Die fertiggestellte Musterfläche mit dem oben beschriebenen „weißen Mörtel“ zeigt Abbildung 73.

Abbildung 73: Fläche nach Applikation des weißen Mörtels – am Tag der Verfugung



6.2.3 Beurteilung der Musterflächen nach 18-monatiger Standzeit

Eine Beurteilung der Musterfläche erfolgte bis zu einer 18-monatigen Standzeit.

Schon nach kurzer Zeit (14 d nach Fertigstellung) waren in den oberen Bereichen der Musterflächen vereinzelt feine Haarrisse innerhalb des Mörtels festgestellt worden. Die Risse waren so fein, daß sie für die Dauerhaftigkeit des Mörtels zunächst keine Beeinträchtigung darstellen und durch Witterungsprozesse möglicherweise wieder „verheilen“ können. An gleichzeitig in Ziegelmauern verarbeitetem Material gleicher Zusammensetzung traten solche Haarrisse jedoch nicht auf. Auch aufgrund der im Labor ermittelten Längenänderungen war nicht mit der Bildung von Schwindrissen zu rechnen.

Ob der erhöhte Wassergehalt bei Anmischen der Mörtel vor Ort oder ein nicht ausreichendes Vornässen des Untergrundes ursächlich für die Bildung dieser feinen Schwindrisse ist, kann nicht mehr nachfolzogen werden.

Nach 18-monatiger Standzeit waren an den applizierten Mörteln außer den bereits erwähnten feinen Haarrissen keinerlei Schäden zu erkennen. Der Mörtel zeigte aufgrund der Verwendung eines hellen Kalksteinbrechsandes eine mit dem Originalmaterial vergleichbare Oberflächentextur und passte sich gut in das Gesamtbild ein.

Mörtel, die zur gleichen Zeit an Versuchsmauern aus Ziegelstein appliziert wurden, zeigen keinerlei Schäden.

Die oben genannten Rezepturen sind daher als dauerhaft und für den Außenbereich einsetzbar zu bewerten.

Eine weitere Beobachtung der Musterflächen sollte erfolgen, aus zeitlichen Gründen konnte dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht geschehen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden wasserresistente Gipsmörtel auf Basis herkömmlicher Bindemittel für eine Anwendung im Außenbereich entwickelt. Die Entwicklung solcher Gipsmörtel ist aufgrund der folgenden Problematik notwendig: Gips ist ein traditioneller Baustoff, der in zahlreichen Bauwerken auch im Außenbereich als Gipsmörtel verarbeitet wurde. Neben gut erhaltenen Objekten finden sich jedoch auch stark geschädigte Bauwerke, welche mit geeigneten Mörteln restauriert werden müssen.

Anforderungen an solche Mörtel sind die Verträglichkeit mit dem Altmaterial sowie eine ausreichende Wasserresistenz, ohne die ein Einsatz im Außenbereich nicht möglich ist.

Das methodische Vorgehen zur Entwicklung der Gipsmörtel umfasste die folgenden Bereiche:

- Untersuchung historischer Gipsmörtel
- Entwicklung einer Prüfmethode zur Untersuchung der Wasserresistenz
- Entwicklung geeigneter Bindemittelrezepturen und Mörtel
- Musterhafte Applikation geeigneter Mörtel an geschädigten Gebäuden

Ein wichtiger Punkt bei der Entwicklung von Restauriermörteln ist generell die Verträglichkeit mit dem Altmaterial (Mörtel, ggf. Stein). Vor der Formulierung eines Anforderungsprofils steht daher die Untersuchung entsprechender historischer Proben.

Weiterhin können aus den Ergebnissen der Analyse historischer Gipsmörtel ggf. Ursachen für die Dauerhaftigkeit abgeleitet und für die Entwicklung von Mörteln genutzt werden.

Untersuchung historischer Gipsmörtel

Eine gezielte Probennahme historischen Materials fand an den Kirchen Johannes-Servatius in Pöhlde und St. Cyriaci in Dorste statt. Zusammen mit dem dort entnommenen Probenmaterial wurden weitere Einzelproben diverser, mit Gips gemauerter Bauwerke bezüglich ihrer technologischen Kennwerte untersucht.

Die Ergebnisse der qualitativen/quantitativen Phasenanalyse der Proben aus Pöhlde und Dorste zeigen, daß es sich um nahezu reine Gipsmörtel handelt. Der Calciumsulfat-Anteil liegt bei durchschnittlich ca. 95 M.-%. Ein Teil davon liegt als Anhydrit vor (7,5 M.-% (Dorste) – 11 M.-% (Pöhlde)), der Rest als Calciumsulfat-Dihydrat. Reste von Anhydrit finden sich zumeist im Inneren von größeren Körnern, welche in die feinere Gipsmatrix eingebettet sind, wie die Dünnschliffaufnahmen belegen.

Das läßt darauf schließen, daß es sich bei den Mörteln wahrscheinlich um sogenannte „Hochbrandgipse“ handelt. Die Phasenzusammensetzung solcher Gipse ist ein Gemisch

diverser Calciumsulfate mit großem Anhydrit-Anteil. Dafür spricht auch der „Calcitschleier“, der sich um diese Grobkörner gelegt hat und für einen Hochbrand mit Entsäuerung typisch ist. Die quantitativen Untersuchungen ergeben einen Carbonat-Gehalt von 0,5 – 1,5 M.-%. Als weitere Bestandteile der Mörtel ist säureunlöslicher Zuschlag in Mengen von 0,4 – 1,3 M.-% enthalten. Eine Untersuchung dieses Zuschlags mittels Röntgenbeugungsanalyse ergab, daß es sich dabei um ein Gemisch aus Quarz und diversen Schichtsilikaten, u.a. Talk, handelt.

An der Johannes Servatius-Kirche in Pöhlde finden sich zwei Varietäten aus unterschiedlichen Bauabschnitten. Diese Mörtel unterscheiden sich auch in ihrer chemischen Zusammensetzung geringfügig. Im wohl älteren, gotischen Mörtel sind Kohlepartikel (Reste verkohlten Brennmaterials) vorhanden, die diesem Mörtel auch die graue Farbe verleihen. Der Anteil an säureunlöslichem Zuschlag ist bei dieser Varietät etwas geringer und auch die Porenradienverteilung unterscheidet sich von der des jüngeren, barocken Mörtels.

Bei Untersuchung der Proben aus Dorste finden sich vergleichbare Ergebnisse. Die Gehalte an säureunlöslichem Zuschlag und an Carbonat sind etwas niedriger. Kohlepartikel wurden in diesen Mörteln nicht gefunden. Bei vergleichbarer Porenradienverteilung ist die Gesamtporosität der Dorster Proben etwas geringer (28 Vol.-%) als die der Mörtel aus Pöhlde (33 Vol.-%).

Der Gesamtgehalt an löslichen Salzen ist bei allen Proben nicht größer als 0,8 M.-%, in der Regel aber deutlich kleiner. Hauptbestandteil dieser Salze sind die Ionen Natrium, Magnesium und Nitrat.

Die Untersuchung der technologischen Kennwerte (E-Modul, Biegezug- und Druckfestigkeit) des historischen Materials aus Pöhlde und Dorste, sowie der Einzelproben anderer Bauwerke ergab eine breite Streuung der Werte. Es wurden Druckfestigkeiten im Bereich von 5 – 25 N/mm² gefunden. Eine geringe Wasseraufnahme und relativ niedrige Porositäten zeigen, daß es sich bei den untersuchten Proben teilweise um sehr dichte Mörtel handelt. Dies kann auch durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen belegt werden (Proben O1, O2, D4), trifft jedoch nicht auf alle Proben (P1, P4) zu.

Aufgrund der Ergebnisse wurde folgendes Anforderungsprofil für Gipsmörtel für den Außenbereich aufgestellt:

- Wasserresistenz möglichst hoch (Masseverlust < 30 M.-%)
- Druckfestigkeit 10 – 20 N/mm²
- Dynamischer E-Modul ≤ 15 kN/mm²
- Quellen/Schwinden ≤ ± 0,15 mm/m
- Verträglichkeit mit dem Altmaterial

Berücksichtigt wurden dabei nicht nur die Ergebnisse aus der Untersuchung der Mörtel aus Pöhlde und Dorste, sondern auch solche weiterer Einzelproben, sowie in der Literatur genannte Kennwerte (LUCAS 92, MIDDENDORF 91).

Wichtigstes Kriterium für einen Einsatz von Gipsmörteln im Außenbereich ist eine ausreichende Wasserresistenz.

Normen oder anerkannte technische Regeln zur Überprüfung der Wasserresistenz von Gipsbaustoffen liegen z.Zt. jedoch nicht vor, da deren Einsatz weiterhin vorwiegend im Innenbereich gesehen wird.

Die Untersuchung und Bewertung verschiedener Prüfmethode zur Wasserresistenz war daher Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Die Ergebnisse sind im folgenden zusammengefasst.

Entwicklung einer Prüfmethode zur Untersuchung der Wasserresistenz

Die Schädigung von Gipsmörteln aufgrund von Wassereinfluß beruht vor allem auf den folgenden Mechanismen:

- Lösung des Gipses und Abtransport des gelösten Materials (z.B. durch Schlagregen etc.)
- Prozesse der Umkristallisation, d.h. in Lösung gehen und auskristallisieren an anderer Stelle (z.B. durch Mauerwerksfeuchte, aufsteigende Feuchte etc.)

Beide Prozesse führen auf Dauer zu einer Schwächung des Gefüges und wurden bei der Prüfung auf Wasserresistenz durch die Wahl unterschiedlicher Lagerungen berücksichtigt. Es handelte sich dabei um folgende Methoden (siehe Kapitel 2.5):

- I. Lösungsverhalten
- II. Lagerung in fließendem Wasser
- III. Ständige kapillare Wasseraufnahme („Faulen“ von Gips)
- IV. Beregnung/Trocknung
- V a) kapillare Wasseraufnahme (temporär, über die Stirnfläche der Prüfprismen)/Trocknung
- b) kapillare Wasseraufnahme bis zur Durchfeuchtung (über die Seitenfläche der Prüfprismen)/Trocknung

Es hat sich gezeigt, daß der Lösungsprozeß in vergleichbaren Zeiträumen zu stärkeren Schädigungen führt als Prozesse der Umkristallisation. Bei Untersuchung der Wasserresistenz mit den Methoden I, II und IV konnten je nach Probe mehr oder weniger hohe Masseverluste beobachtet werden. Eine Differenzierung zwischen geeigneten und weniger geeigneten Proben

war schon nach relativ kurzer Zeit möglich. Als Konsequenz dieser Masseverluste war teilweise ein Absinken der E-Moduln der untersuchten Proben feststellbar. Hohe Quell- bzw. Schwindwerte konnten bei den oben genannten Methoden nicht beobachtet werden.

Bei den Methoden III, Va und Vb handelt es sich um Lagerungen mit einer kapillaren Wasseraufnahme, bei denen eher der Prozeß der Umkristallisation im Vordergrund steht. Wenn reine Lösungsprozesse stattfanden, dann nur in den Bereichen, in denen direkter Kontakt mit Wasser gegeben war, d.h. innerhalb eines Bereichs von ca. 1 cm (siehe Kapitel 4.2). Die auftretenden Masseverluste sind daher bei gleicher Lagerungsdauer geringer als bei den oben erwähnten Methoden.

Im Rahmen der Lagerung nach Methode III kommt es bei allen Proben aufgrund der Wasseraufnahme zu einer Massenzunahme. Die Massenänderungen, welche im Rahmen der Lagerungen nach Methode Va,b auftreten, sind zunächst wohl auch eher auf Änderungen des Feuchtehaushalts der Mischungen zurückzuführen, statt auf einen Materialverlust bzw. auf eine Nachhydratation des Anhydrits. Bei länger andauernder Lagerung kommt es im Kontaktbereich mit Wasser zu echten Lösungserscheinungen, während in Bereichen mit der Möglichkeit zur Verdunstung gleichzeitig Ausblühungen an der Probenoberfläche zu finden sind. Bei diesen Ausblühungen handelt es sich im wesentlichen um Gips und Syngenit (bei Proben, denen Anreger (K_2SO_4) zugesetzt wurde) bzw. bei den kalkmodifizierten Mörteln auch um Calcit.

Änderungen der E-Moduln sind auch bei diesen Lagerungen relativ gering. Deutliche Effekte sind nur bei den Proben zu beobachten, die noch reaktionsfähigen Anhydrit enthalten, also nicht vollständig hydratisiert sind (α -HH und NA). Diese Reaktion führt dann auch zu einem mehr oder weniger starken Quellen bei entsprechender Lagerung.

Für die Überprüfung der Wasserresistenz von Gipsmörteln sind die Lagerungen/Methoden II (Lagerung in fließendem Wasser), IV (Beregnung/Trocknung) und ergänzend III (ständige Wasseraufnahme durch kapillares Saugen) geeignet.

Die Methoden II und IV erlauben in relativ kurzer Zeit eine Differenzierung der Proben bezüglich der Widerstandsfähigkeit gegenüber Lösungsprozessen, die durch diese Lagerungen gefördert werden. Mit Methode IV ist zudem eine Wechsellagerung mit einbezogen, bei der auch Prozesse der Umkristallisation, wenn auch untergeordnet, eine Rolle spielen. Methode III wurde aufgenommen, um Schäden festzustellen, die durch ständige Feuchte mit der Möglichkeit zur Verdunstung entstehen (z.B. Längenänderungen, Ausblühungen).

Die Entwicklung der Gipsmörtel für den Außenbereich erfolgte zunächst im wesentlichen unter Berücksichtigung der Wasserresistenz. Dabei wurden verschiedene Ansätze verfolgt: Zum einen der Einsatz von Zusatzmitteln, um eine Änderung der Kristallmorphologie und damit eine Verringerung der Wasserlöslichkeit zu bewirken, zum anderen der Einsatz von anderen Bindemitteln und Zusatzstoffen, um eine Verdichtung des Gefüges zu erreichen.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist im folgenden geschildert.

Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel

Die Zugabe von organischen Säuren/Salzen führt zu einer Gefügevergrößerung und zu einer Erhöhung der Wasserresistenz, jedoch nur in sehr geringem Maße (max. 5 %, abhängig von der verzögernden Wirkung).

Der Einsatz von Proteinen führt ebenfalls zu einer auffallenden Gefügevergrößerung, eine deutliche Verbesserung der Wasserresistenz ist jedoch nicht damit verbunden. Bis auf Kasein wirken alle Proteine verzögernd. Sie sollten jedoch in Mengen kleiner 0,5 M.-% bezogen auf das Bindemittel eingesetzt werden, da die verzögernde Wirkung und der damit verbundene Festigkeitsverlust sonst zu groß werden.

Bei Mischungen auf Basis von Anhydrit erscheint ein Einsatz von Proteinen nicht sinnvoll.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, daß schon geringe Mengen an Kalk die Wasserresistenz deutlich verbessern. Abhängig vom eingesetzten Bindemittel (α -Halbhydrat > Thermoanhydrit > Naturanhydrit) sinken dabei die Festigkeiten mehr oder weniger stark. Die Erhöhung der Wasserresistenz bei Kalkzugabe läßt sich zum einen durch Gefügeveränderungen erklären (Gefügevergrößerung beim α -HH), zum anderen bildet der Kalk ein schützendes Gerüst um die Gipskristalle, welches auch noch bestehen bleibt, wenn der Gips bereits nahezu vollständig herausgelöst ist.

Bei hohen Kalkgehalten (>30 M.-%) treten teilweise sehr hohe Schwindwerte auf (bis zu -4 mm/m). Mischungen mit höherem „Gips“-anteil (z.B. Anhydrit 90 % / CL 80 10 %, Anhydrit 80 % / CL 80 20 %, bzw. Anhydrit 90 % / HL 2 10 % – Anhydrit 70 % / HL 2 30 %) auf Basis von Thermoanhydrit oder Naturanhydrit sind als Bindemittel geeignet für die Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel. Mischungen mit Naturanhydrit zeigen jedoch im Vergleich zu solchen mit Thermoanhydrit bei Einwirkung von Feuchte ein leicht erhöhtes Quellen.

Auf das Schwindverhalten der Gips-Kalk-Bindemittel wirkt sich die Zugabe von Hüttensand positiv aus. Reine Gips-Hüttensand-Mischungen sind nicht geeignet, da in diesem Fall eine Abnahme der Festigkeit im Vergleich zum reinen Anhydrit zu beobachten ist. Der Masseverlust nach Wasserlagerung wird bei Zugabe von 20 % Hüttensand um ca. 10 %

herabgesetzt. Erst der Zusatz von Weißkalkhydrat bewirkt eine weitere Verbesserung der Wasserresistenz.

Der Einsatz von Microsilica führt bei gleichzeitiger Zugabe von Kalk ebenfalls zu einer Verbesserung der Wasserresistenz, die Festigkeitseinbußen sind jedoch wesentlich größer als bei vergleichbaren Gips-Kalk-Mischungen. Die resultierenden Festigkeiten sind so gering, daß diese Mischungen in der Praxis nicht einsetzbar sind.

Die Zugabe des inerten Zusatzstoffes Kalksteinmehl verringert das Schwinden und senkt die Festigkeiten der Gips-Kalk-Mörtel bei gleichbleibend hoher Wasserresistenz. Ein Teil der Eigenschaften entspricht damit den im Anforderungsprofil geforderten Kennwerten.

Die Verarbeitbarkeit solcher pastösen Mörtel kann durch den Einsatz von Zuschlag geeigneter Sieblinie verbessert werden. Als Zuschlag wurde Anhydrit-, Gips- und Kalksteinbrechsand mit jeweils gleicher Körnung eingesetzt. Von den untersuchten Zuschlägen sind Kalksteinbrechsand und bedingt Anhydritbrechsand für die Entwicklung wasserresistenter Gipsmörtel geeignet.

Diese Mörtel weisen eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber dem lösenden Angriff (Lagerung in fließendem Wasser) auf, die Zugabe von Anhydritbrechsand kann jedoch bei einer dauernden Feuchtlagerung (Lagerung II) bzw. auch bei Feuchtlagerung mit der Möglichkeit zur Verdunstung (Methode III) zu Quellprozessen durch die nachträgliche Hydratation des Anhydrits führen. Bei lang andauernder Lagerung ist eine Schädigung des Gefüges nicht auszuschließen.

Unabhängig von der Art des verwendeten Zuschlags wird das Wasserrückhaltevermögen und die „Standfestigkeit“ (Thixotropie), speziell bei einem Einsatz als Mauermörtel, durch den Kornaufbau verbessert.

Als geeignete Mischungen erwiesen sich Rezepturen mit einem Bindemittelgemisch aus 80 M.-% Anhydrit (TA oder NA, angeregt mit 0,6 % Kaliumsulfat bzw. 1 % Gips) und 20 M.-% Kalk (CL 80, HL 2) mit Kalksteinbrechsand mit geeigneter Sieblinie als Zuschlag.

In Kombination mit unterschiedlichen Bindemittel/Zuschlag-Verhältnissen (B/Z 1:1 oder 1:2) sind damit Rezepturen gegeben, die den im Anforderungsprofil genannten Eigenschaften entsprechen.

Um die Dauerhaftigkeit der entwickelten Mörtel zu prüfen, folgten der Untersuchung im Labor weitere Praxiserprobungen. Geeignete Mischungen wurden an frei bewitterten Ziegelmauern appliziert, desweiteren erfolgte eine objektbezogene Optimierung von geeigneten Mischungen

für die Anlage von Musterflächen an den Kirchen Johannes-Servatius in Pöhlde und St.Cyriaci in Dorste.

Praxiserprobungen an Musterflächen

Eine Applikation der in Kapitel 6 beschriebenen Mischungen fand im Juli 2000 an den Kirchen Johannes-Servatius in Pöhlde, Kreis Herzberg und St. Cyriaci in Dorste, Kreis Osterode im Harz, statt. Eine erste Begutachtung der Musterflächen wurde im November 2000 durchgeführt. Dabei wurden vereinzelt feine Haarrisse vorwiegend im oberen Bereich der Musterflächen festgestellt. Diese Haarrisse stellen für die Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Bewitterung der Mörtel vermutlich keine Beeinträchtigung dar und können eventuell durch Prozesse der Umkristallisation im Laufe der Zeit „verheilen“. Schäden durch Lösungsprozesse konnten zu diesem Zeitpunkt nicht beobachtet werden.

Im gleichen Zeitraum angelegte Musterflächen an Ziegelmauern weisen keine solchen Haarrisse auf. Auch hier waren nach mehr als einjähriger Standzeit keine Schäden zu erkennen.

Fazit:

Die Untersuchung intakter, sowie geschädigter historischer Proben zeigt, daß die Exposition der Mörtel im Bauwerk eine entscheidende Rolle bei der Schädigung durch Bewitterung spielt. Solche in der Praxis auftretende Schäden, wie z.B. Lösungs- oder Treiberscheinungen (z.B. durch Umkristallisation , sekundäre Rehydratation) können im Labor durch geeignete Feucht- oder Wechsellagerungen nachgestellt werden.

Gipsmörtel auf der Basis von Anhydrit und ca. 10 –20 M.-% Kalk (CL 80 oder NHL 2, bezogen auf den Anteil an Bindemittel), sowie einem Zuschlaganteil von < 66 M.-% zeigen eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber Bewitterung und den damit verbundenen Schäden.

Dies konnte mit der Applikation von Mörteln der o.g. Zusammensetzung an ausgewählten Objekten belegt werden.

8 Literaturverzeichnis

- AIGNESBERGER** A. Aignesberger, H.G. Rosenbauer: Hydrophobierung von Zement- und Gipsmörteln, Tonindustrie-Zeitung, 96, 1972, S. 29-34.
- BENZ** G.H. Benz: Veränderung des Versteifen von Gips durch Zusatzmittel, Stuckgewerbe, 12, 1969, S. 533-542.
- BOENKENDORF** U. Boenkendorf, M. Degenkolb, D. Knöfel: Proteine als Zusatzmittel in Kalkmörteln, Fortdruck aus: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall-Steinkonservierung, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, Bd. 5, 1993, S. 129-137.
- CHVATAL** Th. Chvatal: Systematische Versuche zur Hydrophobierung des Gipses, Zement-Kalk-Gips, 28, 1975, S. 337-341.
- DEGENKOLB** M. Degenkolb, D. Knöfel: Untersuchungen zum Einfluß von Holzkohle-Zusatz zu Kalkmörteln, Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1994-1996, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, Bd. 6, 1998, S. 237 ff
- ENGELKE** H. Engelke: Veränderung mechanischer Eigenschaften von Gipsbaustoffen bei und nach Durchfeuchtung, Zement-Kalk-Gips, 32, 1979, S. 560-568.
- FORG** G. Forg: Einfluß von verschiedenen Verzögerern auf die Kristallisation und die Festigkeiten von Stuckgips, Zement-Kalk-Gips, 42, 5/1989, S. 229-232.
- FREYBURG** S. Freyburg: Qualitätsmerkmale historischer Ziegel, Ziegelindustrie international, 50, 1997, S. 411 ff.
- GIPS-DATENBUCH** Herausgeber: Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V., 1. Auflage, Darmstadt, 1995
- GLADKI** J. Gladki: Hydraulisierung von Baugips unter Zumischung von Flugasche und Portlandzement, Baustoffindustrie, 1968, S. 12 ff.
- GÖTZE** M. Götze, R. Hempel, K.H. Tausch: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit hydrophobierter Gips-Wandbauplatten bei thermisch-hygrischer Wechselbelastung, Zement-Kalk-Gips, 48, 1995, S. 555-565.
- GRAF** F. Graf, F. Rausch: Gipshilfsprodukte – ihre Anwendung und Wirkung, Zement-Kalk-Gips, 4, 1951, S. 117-122.

- HAIJOUJI** A. E. Hajjouji, M. Murat: Strength development and hydrate formation rate investigation on anhydrite binders, cement and concrete research, Vol. 17, 1987, S. 814-822.
- HENNING** O. Henning, O. Eggert: Zur feuchtigkeitsbedingten Veränderung von Gipsbaustoffen, Zement-Kalk-Gips, 52, 1999, S. 154-159.
- HEUER** M. Heuer, K. Leschonski: Results obtained with a new instrument for the measurement of particle size distributions from diffraction patterns, particle characteristics, 1985, S. 7-13.
- HOFFMANN** E. Hoffmann, A. Sarracz: Oberflächenbehandlung von gegossenem Gips zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen Wasser, Zement-Kalk-Gips, 16, 1963, S. 93-97.
- ISRAEL** D. Israel: Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Hydratationsgrad, Biegezugfestigkeit und Gefüge abbindenden Anhydrits, Zement-Kalk-Gips, 49, 4/1996, S. 228-234.
- KARSTEN** R. Karsten: Bauchemie, Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1983, S. 260.
- KLOPPE** A. Kloppe: Wasserfestmachung von Gips, Silikattechnik, 13, 1968, S. 446-448.
- KNÖFEL 79** D. Knöfel: Bautenschutz mineralischer Baustoffe, Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1979.
- KNÖFEL 93** D. Knöfel, P. Schubert: Handbuch Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1993
- KOTTAS** H. Kottas: Das Resonanzverfahren zur Messung mechanischer Schwingungen und Materialeigenschaften, Zeitschrift für Instrumentenkunde, 72, 1964, S. 199-204.
- KRÄMER** G. Krämer: Anwendung von hydrophobem Gipsbinder im Bauwesen, Bauzeitung, 43, 1988, S. 173-176.
- KRÖNERT 72** W. Krönert, P. Haubert: Rasterelektronenmikroskopische Beobachtungen bei der Hydratation von α - und β -Calciumsulfat-Halbhydrat, Zement-Kalk-Gips, 25, 1972, S. 553-558.
- KRÖNERT 75** W. Krönert, P. Haubert: Untersuchungen zum Mechanismus des Abbindens von α - und β -Halbhydrat in den Anfangsstadien, Tonindustriezeitung, 99, 1975, S. 238-245.

- KULKE** H. Kulke: Die alte Burg zu Osterode, Heimatblätter für den südwestl. Harzrand, Hrsg.: Heimat- u. Geschichtsverein Osterode, Heft 54, S. 34-60
- LENZ** R. Lenz, Restaurator: mündliche Mitteilung
- LINDER** R. Linder: Silica für Beton-Bauteile und -waren, Betonwerk in der Fertigteil-Technik, 11, 1992, S. 63 ff.
- LUCAS 74** G. Lucas: Versteifen von Gips, Zement-Kalk-Gips, 27, 1974, S. 233-239.
- LUCAS 92** H.G. Lucas: Gips als historischer Außenbaustoff in der Windsheimer Bucht, Dissertation im Fachbereich Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der RWTH Aachen, 1992.
- LUCAS 95** H.G. Lucas, U. Ludwig, H.J. Oel: Die Beständigkeit historischer Gipsmörtel innen und außen, Bauphysik, 17, 1995, S. 17-26.
- MALLON** Th. Mallon: Die Verzögerungswirkung von Gipsverzögerern verschiedener chemischer Zusammensetzung in Abhängigkeit vom pH-Wert des Gipses, Zement-Kalk-Gips, 41, 1988, S. 309-311.
- MATYSZWESKI** T. Matyszewski, et al.: Modifizierung der Eigenschaften des Chemiegipses mit Hilfe verschiedener Zusatzmittel, Tonindustrie-Zeitung, 104, 1980, S. 89-91.
- MENNERICH** H.H. Mennerich (Fa. geotechnik): Bedienungsanleitung für Kohlensäureapparat nach Scheibler-Finkener
- MIDDENDORF** B. Middendorf, Charakterisierung historischer Mörtel aus Ziegelmauerwerk und Entwicklung von wasserresistenten Fugenmörteln auf Gipsbasis, Dissertation im Fachbereich Chemie der Universität GH Siegen, 1994.
- MIDDENDORF 91** B. Middendorf, D. Knöfel, Chemisch-Mineralogische Mörteluntersuchungen an historischen Ziegelgebäuden in Norddeutschland, 9. Internationale Mauerwerkskonferenz, Berlin, Bd. 3, 1991, S. 1420-1427.
- MIDDENDORF 96** B. Middendorf, H. Budelmann, S.O. Schmidt: Beurteilung und Optimierung des Feuchtwiderstandes von CaSO_4 -gebundenen Fließestrichen, 4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Esslingen, 1996, S. 1771-1786.
- MIDDENDORF 98** Vortrag im Rahmen des anorganisch chemischen Kolloquiums an der Universität GH Siegen, 1998

- MÜLLER** Ch. Müller, P. Schießl: Schwinden mineralischer Baustoffe unter besonderer Berücksichtigung von Calciumsulfatestrichen, Teil 1 und 2, Zement-Kalk-Gips, 49, 1996, S. 266-273 und S. 344-351.
- ODLER** I. Odler, M. Balzer: Investigation in the system portland clinker – gypsum plaster – condensed silica, Materials Research Society Symposium Proceedings, 45, 1992, S. 95-102.
- OHNEMÜLLER** W. Ohnemüller: Die Veränderung von Gipsbaustoffen unter dem Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit, Vortrag XIII. Eurogypsumkongreß, Barcelona, 1977.
- OTTEMANN** J. Ottemann: Der Baustoff Anhydrit, Verlag Technik, Berlin, 1962.
- RÖSLER** Lehrbuch der Mineralogie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1984.
- RUSSELL** J.J. Russell: Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Druckfestigkeit kleiner Gipswürfel, Zement-Kalk-Gips, 13, 1960, S. 345-351.
- SCHMIDT** P. Schmidt: Die Anwendung von Citronensäure und deren Salze als Abbindeverzögerer für Gips – eine Literaturübersicht, Tonindustrie-Zeitung, 105, 1981, S. 27-29.
- SCHOLZ** W. Scholz: Baustoffkenntnis, Werner-Verlag, Düsseldorf, 12. Auflage, 1991
- SCHOLZE** H. Scholze, M. Hurbanic, H. Ruf: Vergleichende Betrachtungen zum Verhalten von Naturgips und Rauchgasgips, Zement-Kalk-Gips, 38, 1985, S. 431-436.
- SINGH I** Singh und Garg, Relationship between mechanical properties and porosity of water-resistant gypsum binder, cement and concrete research, 26, 1996, S. 449-456.
- SINGH II** M. Singh, D. Knöfel: Water-resistant gypsum – a futuristic cement, Indian cement industry deskbook, 5, 1996, S. 70-83.
- STARK 96** J. Stark, S. Stürmer: Bauschädliche Salze, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 103, 1996.
- STARK 97** J. Stark, H. Krug: Baustoffkenngrößen, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 102, 1997.
- STARK 95** J. Stark, B. Wicht: Geschichte der Baustoffe, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 99, 1995.

- STEINBRECHER** M. Steinbrecher, Gipsestrich und –mörtel: Alte Techniken wiederbeleben, Bausubstanz, 1992, S. 59-61.
- STÜRMER** S. Stürmer, E. Freyburg, K.-H. Bastian: Zur Untersuchung und Nachstellung historischer Gips-Kalk-Außenputze im Thüringer Raum, Thesis, Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, 1998, S. 168-177.
- WARSCHEID** T. Warscheid: Untersuchungen zur Biodeterioration von Sandsteinen unter Berücksichtigung der chemoorganotrophen Bakterien, Dissertation im Fachbereich Biologie der Universität Oldenburg, 1990
- WERNER** A. Werner: Sanierung von Kirchenbauten an der Elbe, Bausubstanz, 1986, S. 36-40.
- WIRSCHING** F. Wirsching: Gips, in: Ullmanns technische Enzyklopädie, VCH-Verlag, Weinheim, 1985, Bd. 12, S. 290-314.
- WOLTER** H. Wolter: Eigenschaften und Anwendungsgebiete von siliciumorganischen Verbindungen bei der Hydrophobierung und Verfestigung von mineralischen Baustoffen, Bautenschutz und Bausanierung, 12, 1996, S. 9 ff.

Verwendete Normen

- EN 196 EN 196, Teil 1, Prüfverfahren für Zement - Bestimmung der Festigkeit, Mai 1995
- EN 196, Teil 6, Prüfverfahren für Zement – Bestimmung der Mahlfineinheit, März 1990
- DIN 1060 DIN 1060, Tl. 3: Baukalk, physikalische Prüfverfahren, Januar 1986
- DIN 18555 DIN 18555, Teil 2, Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Frischmörtel mit dichten Zuschlägen, Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts, September 1982
- DIN 18555, Teil 7, Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Frischmörtel, Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mit dem Filterplattenverfahren, November 1987
- DIN 1168 DIN 1168, Teil 2, Baugipse – Anforderung, Prüfung, Überwachung, Juli 1975
- DIN 4226 DIN 4226, Teil 1, Zuschlag für Beton, April 1983
- DIN 52103 DIN 52103, Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert, November 1972
- DIN 52617 DIN 52617, Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen, Mai 1987
- DIN 52615 DIN 52615, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, Mai 1980

9 Anhang

Tabelle A 1: Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

A	Anhydritbrechsand
Ac	Acetat
α -HH	α -Halbhydrat
β -HH	β -Halbhydrat
β_{Bz}	Biegezugfestigkeit
β_D	Druckfestigkeit
CL 80	Weißkalkhydrat CL 80
CL 90	Weißkalkhydrat CL 90 - Luftkalk
Cs	Citronensäure
Ct	Citrat
$E_{dyn.}$	dynamischer Elastizitäts-Modul
G	Gipssteinbrechsand
HL 2	Hydraulischer Kalk HL 2
HS-Z	CEM III/B – 42,5 R -HS
Hüs	Hüttensand
K	Kalksteinbrechsand
Kg	Kollagen
Ks	Kasein
Kstm	Kalksteinmehl
La	Lactalbumin
LF	Luftfeuchte
M.-%	Massenprozent
Ms	Microsilica
NA	Naturanhydrit
Q/S_{max}	Maximal auftretende Längenänderungen
REA-Anhydrit	Anhydrit aus Rauchgas-Entschwefelungsanlagen
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
TA	Thermoanhydrit
Tb	Trockenblut
TCA	Mörtel aus 37,5 M.-% TA, 12,5 M.-% CL 80, 50 M.-% A
TCG	Mörtel aus 37,5 M.-% TA, 12,5 M.-% CL 80, 50 M.-% G

TCK	Mörtel aus 37,5 M.-% TA, 12,5 M.-% CL 80, 50 M.-% K
THA	Mörtel aus 37,5 M.-% TA, 12,5 M.-% HL 2, 50 M.-% A
THG	Mörtel aus 37,5 M.-% TA, 12,5 M.-% HL 2, 50 M.-% G
THK	Mörtel aus 37,5 M.-% TA, 12,5 M.-% HL 2, 50 M.-% K
VB	Versteifungsbeginn
Vol.-%	Volumenprozent
ω	Wasseraufnahmekoeffizient
w_{ab24}	Wasserabgabegrad nach 24 h
W/B	Wasser/Bindemittel-Wert
WRV	Wasserrückhaltevermögen
W_s	Weinsäure
W/T	Wasser/Trockenmörtel-Wert
W_v	volumenbezogener Wasseraufnahmegrad
WZ	Weißzement
μ	Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl

Tabelle A 2: Ausgewählte Kennwerte historischer Gipsproben verschiedener Bauwerke

Proben- bezeichnung	β_{Bz} [N/mm ²]	β_D [N/mm ²]	E_{dyn} [kN/mm ²]
O I	2,8	14,0	15,7
O II	3,4	17,1	18,9
WEND 10	4,8	14,2	16,8
DRU 9	7,0	20,3	18,3
SOND 6	3,5	7,4	9,1
EllJoh 5	7,8	20,8	22,5
OHA 128	8,4	19,8	20,2
HZBG 2000	9,4	25,8	23,6
OHA9 STA	5,9	17,4	19,0

Tabelle A 3: Probenbezeichnung und Lage der Proben an der Johannes-Servatius Kirche in Pöhlde

Linke Fläche Südseite	Höhe	Abstand von der Mauerwerkskante rechts
Proben Mörtel		
P 1	1,50 m	0,10 m
P 2	0,70 m	0,35 m
P 3	2,00 m	1,00 m
Proben Stein		
PS 1	0,50 m	0,60 m
PS 2	1,10 m	0,45 m
PS 3	1,85 m	0,75 m
PS 4	2,00 m	0,55 m
Rechte Fläche Südseite	Höhe	Abstand vom Blitzableiter rechts
Proben Mörtel		
P 4	1,40 m	1,85 m
P 5	1,30 m	1,80 m
P 6	0,55 m	1,05 m
Proben Stein		
PS 5	0,15 m	1,25 m
PS 6	0,60 m	1,25 m
PS 7	1,00 m	1,25 m
PS 8	1,45 m	1,25 m

Abbildung A 1: Kirche Johannes-Servatius in Pöhlde, Südseite



Abbildung A 2: Johannes-Servatius in Pöhlde, Südseite, Bereich B der Probenahme (rechts)



Abbildung A 3: Johannes-Servatius in Pöhlde, Südseite, Bereich A der Probenahme (links)



Tabelle A 4: Probenbezeichnung und Lage der Proben an der St. Cyriaci-Kirche in Dorste

Fläche Fenster (2.Fenster v.l.) Nordseite	Höhe	Abstand vom linken äußeren Fensterrand
Proben Mörtel		
D 1	1,10 m	0,45 m
D 2	1,50 m	0,70 m
D 3	1,50 m	0,70 m unter Dorste 2
Proben Stein		
DS 1	0,85 m	0,95 m
DS 2	1,30 m	0,95 m
DS 3	1,80 m	0,95 m
DS 4	0,70 m	0,95 m
DS 5	0,30 m	0,95 m
Ostseite Fläche Tür	Höhe	Portal links außen
Proben Mörtel		
D 4	1,00 m	1,05 m
D 5	2,05 m	0,95 m
Proben Stein		
DS 6	0,35 m	1,00 m
DS 7	0,70 m	1,00 m
DS 8	1,10 m	1,00 m
DS 9	1,45 m	1,00 m
DS 10	2,00 m	1,00 m

Abbildung A 4: Kirche St. Cyriaci in Dorste, Nordseite



Abbildung A 5: Detailansicht, Nordseite St. Cyriaci, Dorste



Abbildung A 6: Nordseite St. Cyriaci, Dorste –Bereich der Probenahme



Abbildung A 7: St. Cyriaci, Dorste - Ostseite



Abbildung A 8: Ostseite St. Cyriaci, Dorste –Bereich der Probenahme



Tabelle A 5: Gesamtporosität und Porenradienverteilung der historischen Gipsmörtel in Pöhlde (Johannes-Servatius) und Dorste (St. Cyriaci)

		Pöhlde		Dorste (ermittelt an 2 Proben)
		Varietät a „barock“ (ermittelt an 3 Proben)	Varietät b „gotisch“ (ermittelt an 3 Proben)	
Gesamtporosität	[Vol.-%]	33,7 - 35,9	35,9	28,1 - 28,7
mittlerer Porenradius	[μm]	2,27 - 2,86	0,74	1,46 - 2,02
Maximum der Porenradienverteilung	[μm]	2,3 - 2,8	0,8	0,7 - 1,5
Luftporen >10 μm	[Vol.-%]	6,1 - 9,3	6,1	6,6 - 10,9
Kapillarporen 10 μm - 1 μm	[Vol.-%]	20,7 - 25,0	6,3	6,1 - 12,8
Kapillarporen 1 μm - 0,2 μm	[Vol.-%]	2,6 - 3,5	21,3	7,7 - 9,1
Kapillarporen > 0,03 μm	[Vol.-%]	0,3 - 1,6	1,6	0,7 - 1,5
Gelporen < 0,03 μm	[Vol.-%]	0,3 - 0,8	0,6	0,6 - 0,8

Abbildung A 9: Ausblühungen (Gips) auf einer Bindemittelpaste aus α -HH bei Prüfung der Wasserresistenz nach Verfahren III

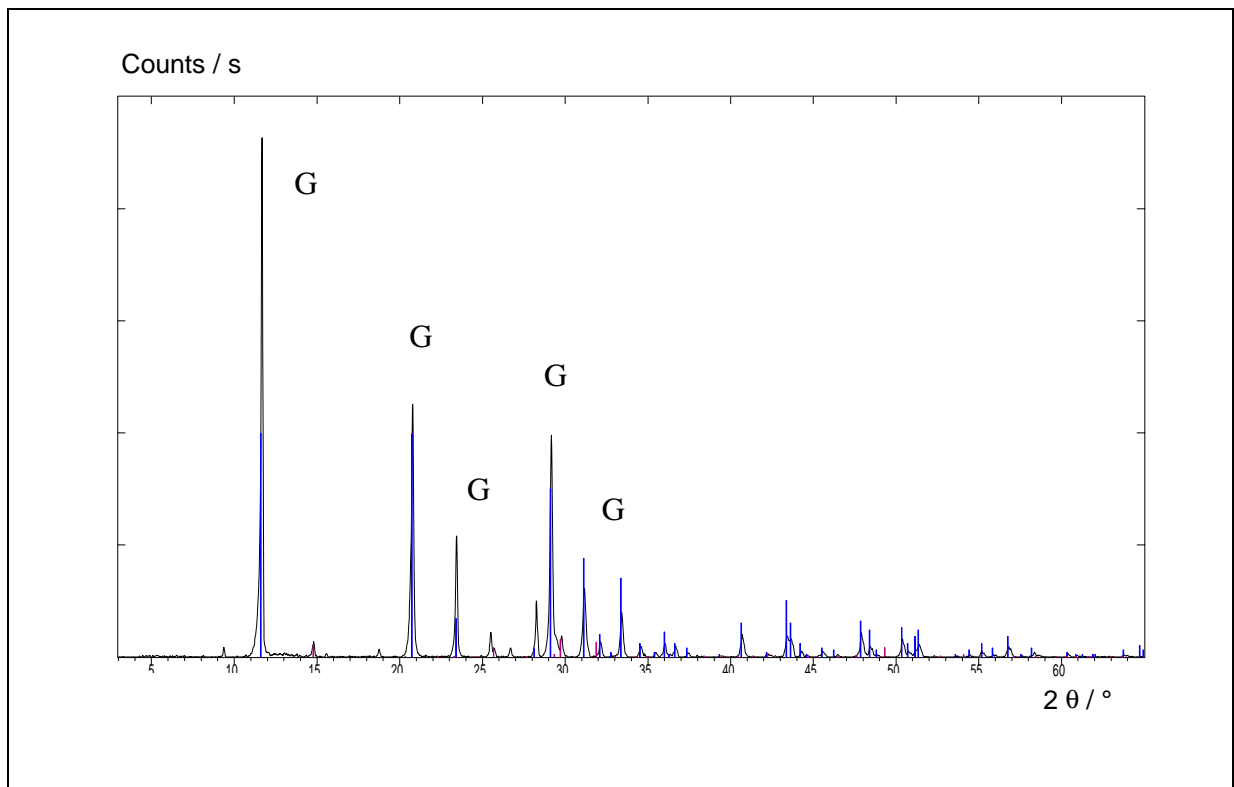


Abbildung A 10: Ausblühungen (Syngenit - S) auf einer Bindemittelpaste aus TA bei Prüfung der Wasserresistenz nach Verfahren III

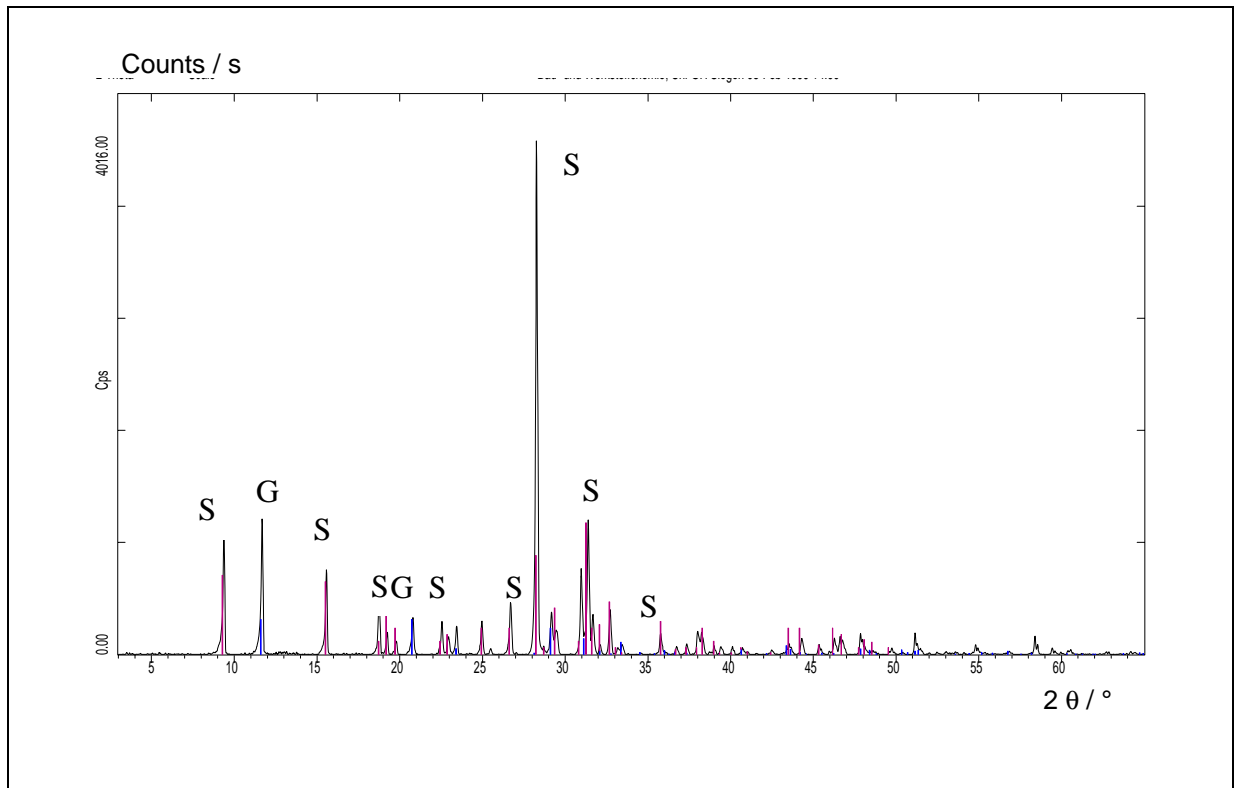


Abbildung A 11: Ausblühungen (Calcit) auf einer Bindemittelpaste aus TA bei Prüfung der Wasserresistenz nach Verfahren III

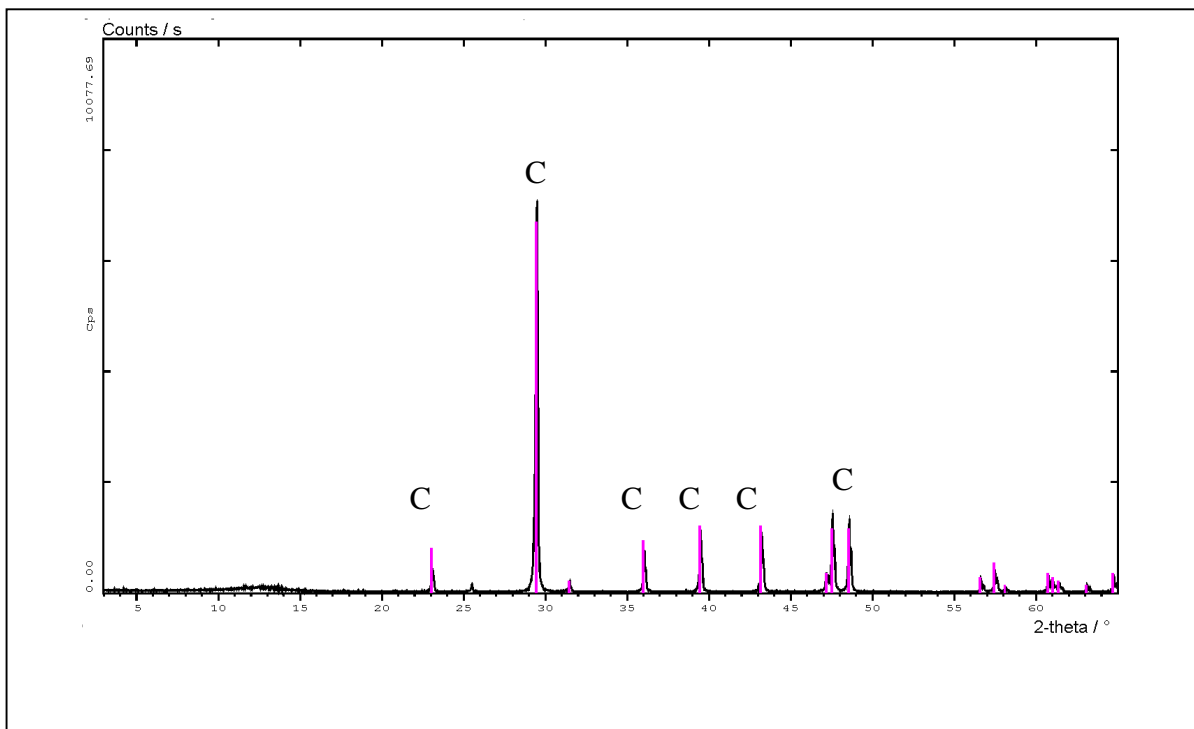


Tabelle A 6: Kumulative Korngrößenverteilung (Lasergranulometrie), Reindichte (Helium-Pyknometer) und spezifische Oberfläche (Lasergranulometrie bzw. Blainewert nach EN 196-6) der verwendeten Bindemittelkomponenten und Zusatzstoffe

Korngröße µm	Durchgangssumme / M.-%											
	α-HH	β-HH	CL 90	CL 80	HL 2	Hüs	HS-Z	Kstm	Ms	NA-a	TA	WZ
0,9	2,35	3,81	7,07	3,87	5,43	3,96	4,38	4,30	0,72	4,83	3,98	4,66
1,1	3,33	5,99	12,05	5,72	8,06	5,73	6,24	6,14	0,98	7,01	5,69	6,31
1,3	4,20	8,33	16,36	7,52	10,69	7,37	7,89	7,78	1,19	9,04	7,24	8,12
1,5	4,97	10,79	20,73	9,28	13,25	8,91	9,37	9,26	1,37	10,93	8,64	9,80
1,8	5,99	14,59	27,21	11,88	17,01	11,05	11,33	11,24	1,62	13,57	10,53	12,14
2,2	7,15	19,69	35,48	15,31	21,86	13,67	13,60	13,55	1,99	16,75	12,74	14,98
2,6	8,15	24,68	43,12	18,73	26,50	16,08	15,56	15,60	2,47	19,63	14,68	17,56
3,1	9,27	30,60	54,56	23,01	31,99	18,88	17,75	17,94	3,29	22,88	16,82	20,54
3,7	10,48	37,03	59,89	28,14	38,10	22,02	20,15	20,59	4,63	26,38	19,11	23,83
4,3	11,62	42,67	66,35	33,20	43,68	24,97	22,44	23,21	6,36	29,54	21,19	26,92
5,0	12,88	48,30	71,97	38,90	49,50	28,23	25,06	26,31	8,74	32,91	23,40	30,34
6,0	14,57	54,96	77,62	46,41	56,64	32,57	28,75	30,80	12,49	37,27	26,25	34,99
7,5	16,86	62,69	83,05	56,12	65,13	38,45	34,06	37,47	18,23	43,00	29,94	41,49
9,0	18,99	68,50	86,46	64,13	71,59	43,70	39,04	43,79	23,61	47,98	33,16	47,50
10,5	21,15	73,06	88,73	70,93	76,75	48,52	43,69	49,55	28,40	52,54	36,23	53,01
12,5	24,16	77,98	90,78	78,58	82,38	54,41	49,39	56,24	33,91	58,26	40,17	59,57
15,0	27,95	82,83	92,63	85,85	87,61	61,01	55,77	63,16	39,94	64,75	44,51	66,84
18,0	32,34	87,02	94,49	91,43	91,55	68,10	62,63	69,79	46,86	71,46	48,69	74,66
21,0	36,77	90,04	95,89	94,98	94,08	74,43	68,86	75,00	53,97	77,28	52,43	81,29
25,0	42,74	92,99	97,05	97,99	96,48	81,38	75,90	80,20	63,59	83,92	57,23	88,01
30,0	49,83	95,44	98,01	99,56	98,13	87,90	82,76	84,83	74,84	90,24	62,64	93,69
36,0	57,72	97,39	98,83	100,0	99,23	93,23	88,77	88,79	85,72	95,35	68,68	97,54
43,0	65,94	98,83	99,54	100,0	99,83	97,00	93,51	92,14	93,94	98,60	75,11	99,50
51,0	74,09	99,75	100,0	100,0	100,0	99,17	96,76	94,97	98,46	100,0	81,75	100,0
61,0	82,61	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,85	97,56	100,0	100,0	88,97	100,0
73,0	90,57	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,89	99,54	100,0	100,0	95,39	100,0
87,0	96,77	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,65	100,0
103,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
123,0	10,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
147,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
175,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Rein- dichte g/cm ³	2,73	2,69	2,39	2,44	2,63	2,95	3,26	2,75	2,35	2,99	2,94	3,10
O _{sp} Laser cm ² /g	2700	6700	9000	6600	7500	4600	4100	4900	2500	6000	4000	4200
O _{sp} Blaine cm ² /g	1400	9400	20900	14000	11700	4000	4100	3100	18600	4200	4200	4000

Tabelle A 7: Ausgewählte Frischmörtelkennwerte der Mörtel im Rahmen der Praxisversuche an Mustermauern aus Ziegelstein

	W/T-Wert	Ausbreit- maß	LP-Gehalt	Rohdichte	Rohdichte in der Form
		[cm]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
Bindemittel: TA 80 %, CL 80 20 % gemagert mit Kstm: 1:1	0,32	16,2	5,8	1,86	1,89
Bindemittel: TA 80 %, HL 2 20 % gemagert mit Kstm: 1:1	0,32	17,1	6,5	1,86	1,91
Bindemittel: TA 80 %, Hüs 10 %, CL 80 20 %, gemagert mit Kstm: 1:1	0,30	16,2	6,9	1,89	1,94

Tabelle A 8: Ausgewählte Kennwerte von Bindemittelpasten aus α -HH und TA

	$\beta_{Bz} - 28 \text{ d}$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28 \text{ d}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}} - 28 \text{ d}$ [kN/mm ²]	Masseverlust ¹⁾ [%]
TA 75 % / α -HH 25 %	4,94	18,0	11,5	58,0
TA 50 % / α -HH 50 %	6,76	27,5	16,6	67,7
TA 25 % / α HH 75 %	9,38	51,3	26,5	68,0
TA 40 % / α HH 40 % / CL 80 20 %	5,14	15,3	12,5	6,9

¹⁾ bestimmt nach Methode II, Lagerung in fließendem Wasser

Tabelle A 9: Ausgewählte Kennwerte von Bindemittelpasten aus β -HH und organischen Säuren/Salzen

	$\beta_{Bz} - 28 \text{ d}$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28 \text{ d}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}} - 28 \text{ d}$ [kN/mm ²]	Masseverlust ¹⁾ [%]
β -HH	8,32	32,3	12,6	79
β -HH + 0,1 M.-% Ws	9,56	25,5	12,0	87
β -HH + 0,1 M.-% Cs	5,26	17,0	9,4	79
β -HH + 0,1 M.-% Ac	9,54	29,9	10,9	79
β -HH + 0,1 M.-% Ct	6,27	21,9	10,7	73

¹⁾ bestimmt nach Methode II, Lagerung in fließendem Wasser

Tabelle A 10: Ausgewählte Kennwerte von Bindemittelpasten aus β -HH und Proteinen in verschiedenen Konzentrationen

	$\beta_{Bz} - 28d$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28d$ [N/mm ²]	E-Modul - 28d [kN/mm ²]
β -HH	8,32	32,3	12,6
β -HH + 0,5 M.-% Kg	5,97	16,8	8,9
β -HH + 1,0 M.-% Kg	4,30	8,2	7,2
β -HH + 1,5 M.-% Kg	n.b.	1,8	4,0
	W/B []	VB [min]	Masseverlust ¹⁾ [%]
β -HH	0,425	13	79
β -HH + 0,5 M.-% Kg	0,415	180	75
β -HH + 1,0 M.-% Kg	0,420	87	320
β -HH + 1,5 M.-% Kg	0,422	78	> 9 h

¹⁾ bestimmt nach Methode II, Lagerung in fließendem Wasser

Tabelle A 11: Ausgewählte Kennwerte von Bindemittelpasten aus TA und Kollagen (Kg) in verschiedenen Konzentrationen

	$\beta_{Bz} - 28d$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28d$ [N/mm ²]	E-Modul - 28d [kN/mm ²]
TA + 0,6 M.-% K ₂ SO ₄	12,89	60,45	27,1
TA + 0,6 M.-% K ₂ SO ₄ + 0,5 M.-% Kg	n.b.	0,57	3,2
TA + 1,2 M.-% K ₂ SO ₄ + 0,5 M.-% Kg	n.b.	0,58	2,9
	W/B []	VB [min]	Masseverlust ¹⁾ [%]
TA + 0,6 M.-% K ₂ SO ₄	0,28	70	51
TA + 0,6 M.-% K ₂ SO ₄ + 0,5 M.-% Kg	0,265	22 h	100
TA + 1,2 M.-% K ₂ SO ₄ + 0,5 M.-% Kg	0,28	6 h	100

¹⁾ bestimmt nach Methode II, Lagerung in fließendem Wasser

Tabelle A 12: Kennwerte von Bindemittelpasten auf Basis von Anhydrit (TA, NA), α -HH und verschiedenen Kalken (CL 80, HL 2)

	$\beta_{Bz} - 28d$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28d$ [N/mm ²]	E-Modul - 28d [kN/mm ²]
TA 98 % / CL 80 2 %	12,92	58,2	24,9
TA 95 % / CL 80 5 %	11,24	52,6	23,7
TA 90 % / CL 80 10 %	7,19	30,8	21,1
TA 80 % / CL 80 20 %	7,06	24,7	17,6
TA 70 % / CL 80 30 %	2,59	4,4	10,2
TA 60 % / CL 80 40 %	1,40	1,2	7,3
TA 90 % / HL 2 10 %	11,48	52,8	22,3
TA 80 % / HL 2 20 %	8,45	37,4	17,4
TA 70 % / HL 2 30 %	4,96	19,5	13,5
TA 60 % / HL 2 40 %	4,41	16,6	9,7
NA 90 % / CL 80 10 %	4,80	14,1	11,0
NA 80 % / CL 80 20 %	3,36	7,0	8,5
NA 70 % / CL 80 30 %	2,30	4,1	4,2
NA 60 % / CL 80 40 %	2,03	3,4	0,3
α -HH 98 % / CL 80 2 %	2,83	8,8	13,5
α -HH 95 % / CL 80 5 %	3,00	8,1	11,0
α -HH 90 % / CL 80 10 %	2,9	6,8	10,0
	W/B-Wert []	VB [min]	Masseverlust ¹⁾ [M.-%]
TA 98 % / CL 80 2 %	0,29	60	31,3
TA 95 % / CL 80 5 %	0,29	77	16,8
TA 90 % / CL 80 10 %	0,30	156	0,6
TA 80 % / CL 80 20 %	0,33	175	0,3
TA 70 % / CL 80 30 %	0,40	130	- 11 :Gew.-Zunahme
TA 60 % / CL 80 40 %	0,45	60	-19 :Gew.-Zunahme
TA 90 % / HL 2 10 %	0,30	63	22
TA 80 % / HL 2 20 %	0,32	112	10
TA 70 % / HL 2 30 %	0,32	147	-0,1 :Gew.-Zunahme
TA 60 % / HL 2 40 %	0,38	167	-2,7 :Gew.-Zunahme
NA 90 % / CL 80 10 %	0,29	31	4,2
NA 80 % / CL 80 20 %	0,34	37	-3,8 :Gew.-Zunahme
NA 70 % / CL 80 30 %	0,42	41	-3,1 :Gew.-Zunahme
NA 60 % / CL 80 40 %	0,47	61	-0,4 :Gew.-Zunahme
α -HH 98 % / CL 80 2 %	0,223	165	35,7
α -HH 95 % / CL 80 5 %	0,223	160	27,2
α -HH 90 % / CL 80 10 %	0,218	130	20,2

¹⁾ bestimmt nach Methode II, Lagerung in fließendem Wasser

Tabelle A 13: Kennwerte von Bindemittelpasten auf Basis von Anhydrit (TA) und verschiedenen Zementen (HSZ, WZ)

	W/B []	$\beta_{Bz} - 28d$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28d$ [N/mm ²]	E-Modul - 28d [kN/mm ²]
TA 90 % / WZ 10 %	0,251	4,68	65,7	23,6
TA 80 % / WZ 20 %	0,256	4,67	68,2	25,8
TA 80 % / WZ 10 % / CL 80 10 %	0,278	4,01	48,4	18,5
TA 90 % / HS-Z 10 %	0,257	5,38	64,9	26,0
TA 80 % / HS-Z 20 %	0,260	6,17	65,4	26,0
TA 80 % / HS-Z 10 % / CL 80 10 %	0,279	5,61	51,4	21,0

Tabelle A 14: Änderung ausgewählter Kenngrößen der Bindemittelpasten auf Basis von TA und verschiedenen Zementen (WZ, HS-Z) durch Lagerung zur Untersuchung der Wasserresistenz (Lagerung II, III und IV) Änderungen bezogen auf den Wert nach Abschluß der Vorlagerung)

Probenbezeichnung / Lagerung zur Prüfung der Wasserresistenz		Massenänderung [%]	E-Modul-Änderung [%]	Q/S max. [mm/m]
TA 90 % / WZ 10 %	II	-2,7	-8,4	n.b.
	III	1,3	1,8	0,12
	IV	-0,6	-43,0	0,48
TA 80 % / WZ 20 %	II	-2,8	-15,5	n.b.
	III	1,1	2,4	0,12
	IV	0,6	-37,7	0,59
TA 80 % / WZ 10 % / CL 80 10 %	II	-17,8	-48,0	n.b.
	III	7,7	13,9	0,45
	IV	2,2	-28,2	1,2
TA 90 % / HS-Z 10 %	II	-3,7	-4,9	n.b.
	III	1,3	-0,1	0,17
	IV	-0,5	-39,9	0,09
TA 80 % / HS-Z 20 %	II	-4,3	-23,1	n.b.
	III	1,2	0,5	0,10
	IV	0,1	-32,6	0,06
TA 80 % / HS-Z 10 % / CL 80 10 %	II	-19,0	-51,3	n.b.
	III	3,6	1,7	0,34
	IV	1,9	-26,5	0,67

Tabelle A 15: Kennwerte von Bindemittelpasten auf Basis von Anhydrit (TA), und den Zusatzstoffen Hüttensand und Microsilica in Kombination mit einem CL 80

	$\beta_{Bz} - 28d$ [N/mm ²]	$\beta_D - 28d$ [N/mm ²]	E-Modul - 28d [kN/mm ²]
TA 80 % / Hüs 20%	13,95	66,1	30,7
TA 80 % / CL 80 10 % / Hüs 10 %	11,66	46,8	29,1
TA 80 % / CL 80 5 % / Hüs 15 %	9,09	35,3	19,9
TA 80 % / Hüs 20%	n.b.	2,06	1,4
TA 80 % / CL 80 10 % / Ms 10 %	2,29	7,4	5,0
TA 80 % / CL 80 5 % / Ms 15 %	4,37	18,1	12,3
	W/B-Wert []	VB [min]	Masseverlust ¹⁾ [%]
TA 80 % / Hüs 20%	0,28	40	44,6
TA 80 % / CL 80 10 % / Hüs 10 %	0,31	90	3,7
TA 80 % / CL 80 5 % / Hüs 15 %	0,33	103	-0,4 Gewichtszunahme
TA 80 % / Hüs 20%	0,41	260	59,5
TA 80 % / CL 80 10 % / Ms 10 %	0,38	320	-6,9
TA 80 % / CL 80 5 % / Ms 15 %	0,37	320	-1,3

¹⁾ bestimmt nach Methode II, Lagerung in fließendem Wasser

Tabelle A 16: Mechanische Kennwerte von Mörteln auf Basis von Anhydrit (TA), verschiedenen Kalken (HL 2, CL 80) und unterschiedlichen Zuschlägen (A, G, K) nach 28-tägiger Vorlagerung sowie nach 90-tägiger Lagerung bei 23/50

Bindemittelzusammen- setzung // verwendeter Zuschlag B/Z-Verhältnis: 1 : 1	β_{Bz} [N/mm ²]		β_D [N/mm ²]		E-Modul [kN/mm ²]	
	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
TA: 75 % HL 2: 25 %// A	6,16	9,77	50,3	60,9	28,2	28,7
TA: 75 % HL 2: 25 %// G	7,87	8,68	42,6	45,1	21,4	23,5
TA: 75 % HL 2: 25 %// K	8,11	10,70	48,5	49,0	27,1	28,0
TA: 75 % CL 80: 25 %// A	7,18	8,56	25,2	21,4	15,7	14,6
TA: 75 % CL 80: 25 %// G	7,26	6,62	30,1	24,5	14,9	14,2
TA: 75 % CL 80: 25 %// K	8,70	10,10	53,8	53,6	26,2	26,5

Abbildung A 12: Röntgenbeugungsdiagramm der Probe TCA nach 90-tägiger Lagerung III
(blau: Verdunstungszone, schwarz: Kontaktzone Wasser)

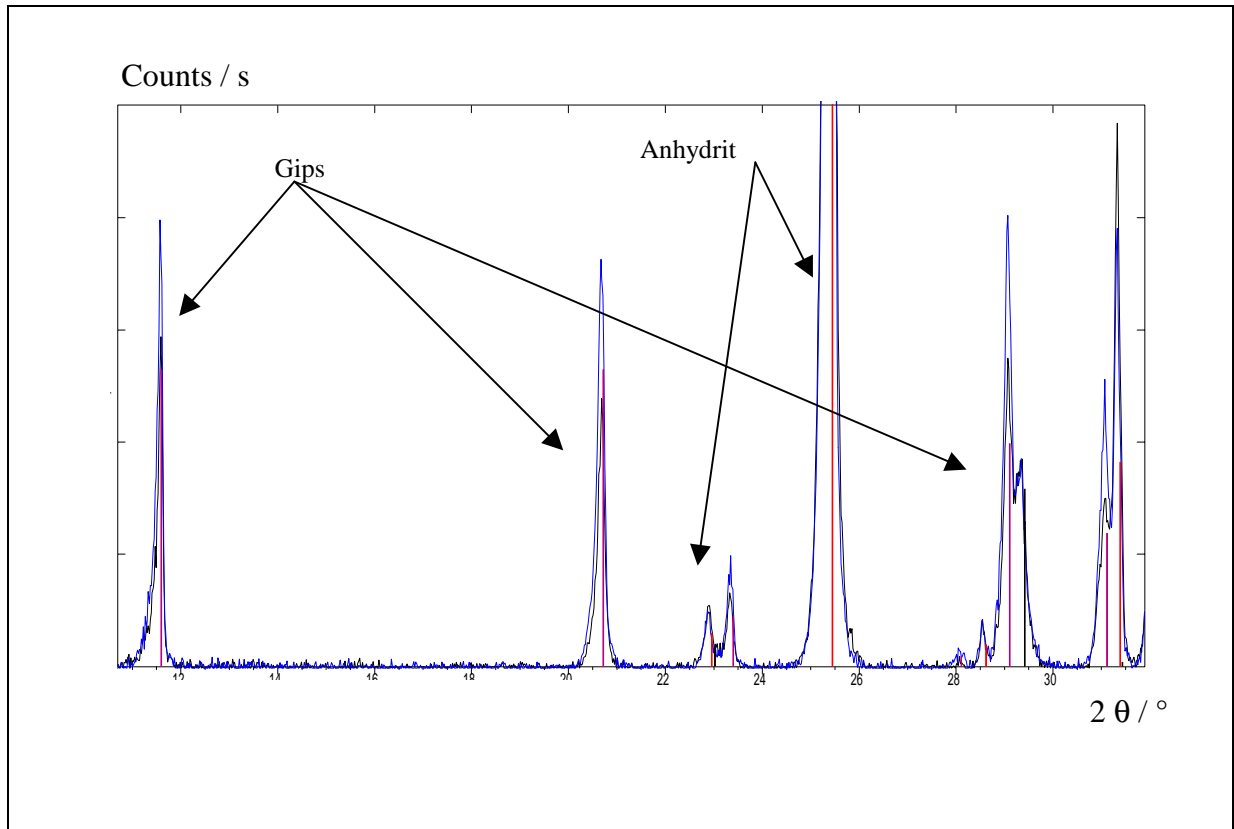


Tabelle A 17: Mechanische Kennwerte der mit Kalk und Kalksteinmehl gemagerten Mischungen in unterschiedlichen Kombinationen und B/Z-Verhältnissen

<u>Bindemittel-</u> <u>Zusammensetzung:</u> 80 % Anhydrit (TA, NA) 20 % Kalk (CL 80, CL 90)	$f_{Bz} - 28 d$ [N/mm ²]	$f_D - 28 d$ [N/mm ²]	E-Modul – 28 d [kN/mm ²]
Bindemittel: TA/CL 80 Zuschlag: K B/Z-Verhältnis: 1:1	7,39	42,3	25,4
Bindemittel: TA/CL 80 Zuschlag: K B/Z-Verhältnis: 1:2	6,36	31,5	24,1
Bindemittel: TA/CL 80 Zuschlag: K 50 %, Kstm 50 % B/Z-Verhältnis: 1:2	6,66	29,3	22,3
Bindemittel: NA/CL 90 Zuschlag: K B/Z-Verhältnis: 1:1	4,78	18,0	13,7
Bindemittel: NA/CL 90 Zuschlag: K B/Z-Verhältnis: 1:2	2,89	12,4	13,3
Bindemittel: NA/CL 90 Zuschlag: K 50 %, Kstm 50 % B/Z-Verhältnis: 1:2	2,81	11,1	12,1
Bindemittel: NA/CL 90 ¹⁾ Zuschlag: K B/Z-Verhältnis: 1:1 Zusatz von 0,9 % Meilerkohle	3,85	16,5	13,6

1) Die mit Meilerkohle eingefärbte Rezeptur wurde im Rahmen der Anlage von Musterflächen an den Johannes-Servatius-Kirche in Pöhlde untersucht (vgl. Kap. 6.1 und 6.2.1)

Tabelle A 18: Mechanische Kennwerte der mit Anhydrit und Kalksteinmehl gemagerten Mischungen in unterschiedlichen Kombinationen und B/Z-Verhältnissen

<u>Bindemittel-</u> <u>Zusammensetzung:</u> 80 % Thermoanhydrit (TA) 20 % Kalk (CL 80, HL 2)	$f_{Bz} - 28 d$ [N/mm ²]	$f_D - 28 d$ [N/mm ²]	$E_{dyn} - 28 d$ [kN/mm ²]	Masseverlust ¹⁾ [%]
Bindemittel: TA/CL 80 Zuschlag: A 50 %, Kstm 50 % B/Z-Verhältnis: 1:1,5	6,35	24,5	18,3	9,8
Bindemittel: TA/CL 80 Zuschlag: A 50 %, Kstm 50 % B/Z-Verhältnis: 1:2	5,06	13,2	11,7	12,8
Bindemittel: TA/HL 2 Zuschlag: A 50 %, Kstm 50 % B/Z-Verhältnis: 1:1,5	9,77	44,5	24,6	1,0
Bindemittel: TA/HL2 Zuschlag: A 75 %, Kstm 25 % B/Z-Verhältnis: 1:1,5	13,95	52,3	26,6	11,1
Bindemittel: TA/HL 2 Zuschlag: A 25 %, Kstm 75 % B/Z-Verhältnis: 1:1,5	8,13	46,5	23,6	14,1
Bindemittel: TA/HL2 Zuschlag: A 50 %, Kstm 50 % B/Z-Verhältnis: 1:2	6,48	16,2	12,5	13,8

¹⁾ bestimmt nach Methode II, Lagerung in fließendem Wasser