

Hochbrandgips zur Restaurierung mittelalterlicher Architekturelemente

Einleitung

Architekturelemente aus Gipsmörtel sind in den Backsteinbauten des ehemaligen Deutschordensgebietes in Preußen weit verbreitet. Die Konsolen, Masswerke, Schlußsteine und Gewölberippen sind in Abgusstechnik angefertigt und teilweise mit Steinmetzwerkzeugen nachgearbeitet. Materialgrundlage der Mörtel ist Hochbrandgips, häufig mit Zugabe von Holzkohle oder Ziegelmehl [1] [2] [3]. Die Elemente sind nicht nur im Innenbereich, sondern auch im Außenbereich (**Abb.1**) und sogar als archäologische Funde erhalten, was die Beständigkeit der mittelalterlichen Gipsmörtel beweist.



Abb.1:
Gipsmörtel-Figuren am Kirchenportal des
Ziesterzienserklosters in Pelplin (Außenbereich)

Ziel eines von der Deutschen Bundestiftung Umwelt geförderten Stipendiaufenthaltes an der MPA Bremen war die Entwicklung von Gips-Reparaturmörteln für Ergänzungen an den mittelalterlichen architektonischen Details, unter besonderer Berücksichtigung der Umwelteinflüsse im Außenbereich. Die Mörtel sollen den gotischen Originalmörteln in ihrer Zusammensetzung und den Eigenschaften möglichst weitgehend entsprechen.

Um im Forschungsvorhaben das denkmalpflegerische Ziel nach einer möglichst hohen Materialauthentizität zu berücksichtigen, wurden als Materialbasis in historischer Brenntechnologie in der Hundisburger Baustoffmanufaktur aus Keuper-Gipsgestein hergestellte Gipsbindemittel gewählt. Der Hundisburger Hochbrandgips mit der Handelsbezeichnung Keuper M wurde schon für unterschiedliche Restaurierungszwecke getestet und mit Erfolg als Reparaturmaterial in mittelalterlichem Mauerwerk eingesetzt [4] [5].

Für die hier beschriebenen Versuche wurden aus dem Gipsstein Keuper-M (M steht für relativ gering verunreinigtes Gestein) zwei Hochbrandgips-Bindemittel bei verschiedenen Brenntemperaturen hergestellt: bei 900°C (weiter als **HBG** bezeichnet) und bei 600°C (ein Testprodukt, hier erstmalig untersucht, weiter als **NT** bezeichnet).

Neben den Eigenschaften der reinen Bindemittel sollte der Einfluss von Holzkohle und Ziegelmehl sowie von Kalkzugabe (Sumpfkalk) untersucht werden. Außerdem wurden ein handelsüblicher Stuckgips sowie eine Mischung aus Stuckgips und Sumpfkalk in die Versuchsserien einbezogen.

Im diesem Artikel werden ausgewählte Ergebnisse des Projektes vorgestellt, die die untersuchten Mischungen charakterisieren und den Einfluss der Komponenten aufzeigen.

1. Bindemittel Hochbrandgips

Als Hauptbestandteile im HBG und NT konnten im Ergebnis von STA (TG-DSC) – Analysen Anhydrit II mit geringen Calcit-Anteilen (2-7 Gew.-%) charakterisiert werden. Es war ersichtlich, dass es sich beim Calcit um primären Kalk aus dem Gipsstein handelt. Hinweise auf die Entstehung zusätzlichen Kalkes beim Gipsbrennen (Entschwefelung von Anhydrit oberhalb 700°C, wie in [6] angegeben) lieferten die Untersuchungen nicht.

Die unterschiedlichen Brenntemperaturen haben auch Auswirkung auf den pH-Wert. HBG weist einen pH-Wert von etwa 12 auf, gegenüber pH 10 bei NT. Ursache der Alkalität ist in beiden Fällen der gebrannte und beim Mischen gelöschte Kalk im Gipsstein. Durch die niedrigere Brenntemperatur enthält der NT weniger aktivierten Kalk. Der Stuckgips ist neutral.

Die aus dem Herstellungsprozess der Bindemittel (Mahlen und Homogenisieren in der Ziegelei Hundisburg) resultierende Kornzusammensetzung (Sieblinien) ist für beide Ausgangsstoffe (HBG und NT) praktisch identisch. Charakteristisch ist ein sehr hoher Feinanteil <0,063mm zwischen 40 Gew.-% (NT) und 50 Gew.-% (HBG).

2. Mörtelrezepturen

In Vorversuchen erfolgte eine optische Anpassung der Rezepturen an die historischen Befunde. Bewertet wurden Menge, Größe und Verteilung aller farbgebenden Bestandteile sowie der groben Körner aus dem Bindemittel.

Im Ergebnis dieser Tests wurden für die Herstellung der Laborprüfkörper von den Hochbrandgips-Bindemitteln die Kornfraktionen >1mm abgetrennt. In gleicher Weise wurde mit Ziegelmehl und Holzkohle verfahren. Verwendet wurden Ziegelmehl <1mm und Holzkohle <0,5mm. Durch das Absieben der größeren Fraktionen ist eine gute optische Anpassung an die ausgewählten gotischen Proben gelungen, wobei die in den betreffenden Mischungen verwendete Buchen-Holzkohle zu einem etwas bläulichen Farbton als an den grauen mittelalterlichen Mörteln führt.

Aus folgenden Rezepturen wurden Laborprüfkörpern (Prismen 160x40x40 mm) hergestellt:

HBG-I	Hochbrandgips (900°C)	HBG	
HBG-II, III	Hochbrandgips mit Ziegelmehl	HBG:ZM	100:2, 100:5 GT
HBG-IV, V	Hochbrandgips mit Holzkohle	HBG:HK	100:2, 100:5 GT
HBG-VI	Hochbrandgips mit Sumpfkalk	HBG:SK	100:20
NT-I	N. g. Hochbrandgips (600°C)	NT	
NT-II, III	N. g. Hochbrandgips mit Ziegelmehl	NT:ZM	100:2, 100:5 GT
NT-IV, V	N. g. Hochbrandgips mit Holzkohle	NT:HK	100:2, 100:5 GT
NT-VI	N. g. Hochbrandgips mit Sumpfkalk	NT:SK	100:20
VII	Stuckgips mit Sumpfkalk	SG:SK	100:20
VIII	Stuckgips	SG	

Für alle Mörtel wurde dieselbe plastische Konsistenz eingestellt. Der Wasseranteil der Mischungen (Wasseranspruch) wurde über das Ausbreitmaß ermittelt (DIN 1168-2:1975). Für ein Ausbreitmaß von 145±3 mm liegen die W/B-Werte der HBG-Proben zwischen 0,32 und 0,35. Die Zugabe von Ziegelmehl und Holzkohle erhöht grundsätzlich den Wasseranspruch. NT-Gips hat trotz eines geringeren Feinanteils im Ausgangsmaterial einen um etwa 20% höheren Wasseranspruch als der HBG-Gips. Als Ursache kann eine höhere Reaktivität des NT-Gipses infolge der niedrigeren Brenntemperatur angenommen werden.

Die Herstellung der Versuchsserien erfolgte in Anlehnung an die DIN-Normen unter Verwendung von Normmischer, Rütteltisch und Stahlformen.

3. Abbindeverhalten

Die Erstarrungszeiten wurden nach DIN EN 196-3:2009 gemessen. Die Zeiträume für die Hochbrandgipse HBG und NT und deren Beeinflussung durch die weiteren Bestandteile sind in **Abb.2** dargestellt.

An reinem HBG setzt die Erstarrung nach 3 Std. ein und endet nach 5 Std. 15 min. Der höhere Ziegelmehlanteil und die beiden zugegebenen Holzkohlemengen verzögern den Erstarrungsbeginn (gegenüber HBG-rein) um 45 min. und verkürzen gleichzeitig die gesamte Erstarrungszeit auf etwa die Hälfte. Die Zugabe von Sumpfkalk verzögert deutlich den Erstarrungsbeginn (auf 6 Std.), das Erstarrungsende der Sumpfkalkmischungen wurde nicht bestimmt.

Bei den NT-basierten Rezepturen setzt die Erstarrung 1-2 Std. später ein, außerdem ist der Erstarrungszeitraum insgesamt kürzer. Der verzögerte Beginn des Prozesses kann mit der höheren Anmachwassermenge begründet werden, während die kurze Erstarrungszeit auf die höhere Reaktivität des Anhydrits zurückzuführen sein dürfte. Sumpfkalkzugabe verursacht hier eine deutliche Beschleunigung des Abbindeprozesses, die Erstarrung setzt nach 1,5 Std. ein und endet nach 2 Std.15 min.. Die Wirkung der Kalkzugabe hängt also von der Brenntemperatur ab, beim niedriger gebrannten NT wirkt der Kalk beschleunigend, während er beim höher gebrannten HBG verzögernd wirkt.

Wie zu erwarten, unterscheidet sich das Erstarrungsverhalten von Stuckgips deutlich von den HBG- und NT-Materialien. Der Erstarrungszeitraum ist sehr kurz, der Erstarrungsbeginn liegt bei 22 min, das Erstarrungsende bei 23,5 min. Sumpfkalkzugabe verändert diese Zeiten auf 32 bzw. 34 min..

Ab dem Zeitpunkt des Erstarrungsanfangs nimmt die Geschwindigkeit der Konsistenzänderungen schnell zu. Der im Labor gemessene Erstarrungsanfang kann als das Ende der Verarbeitbarkeit angenommen werden.

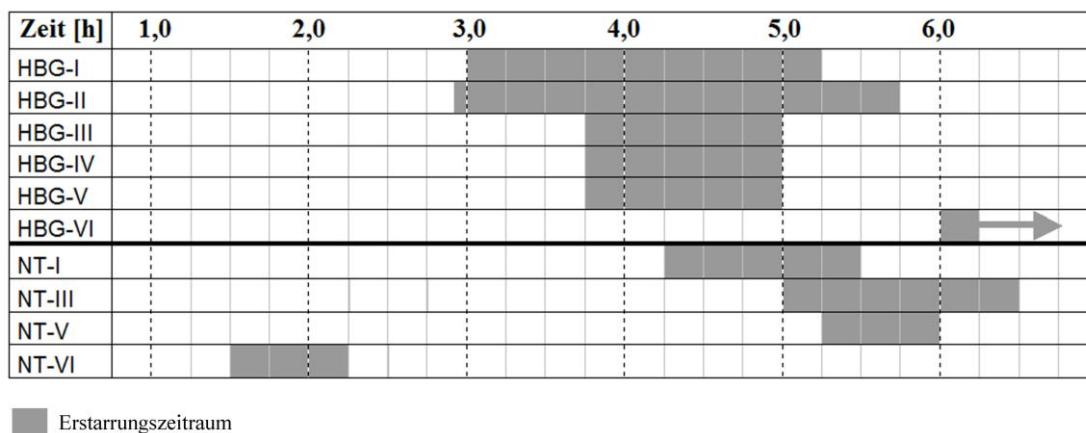


Abb.2. Das Abbindeverhalten der Hochbrandgipsmörtel

4. Lagerungsbedingungen

Alle Prüfkörper wurden insgesamt 28 Tage unter definierten Klimabedingungen gelagert. Die ersten 2 Tage nach Herstellung wurden die Prüfkörper in den Stahlformen im Feuchtekasten aufbewahrt (20°C / ≥ 95% r.F.). Danach wurden die Prismen entformt und entsprechend der folgenden zwei Lagerungsbedingungen weitere 26 Tage gelagert:

Lagerung A: Normklima (20°C, 60% r.F.)

Lagerung B: Normklima (20°C, 60% r.F.), zusätzlich ab dem vierten Tag nach Herstellung alle 4 Tage 10 min. Unterwasser-Lagerung

5. Festmörteligenschaften

Die Rohdichten, die kapillaren Wasseraufnahmen, die Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Werte) und die Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von den Zusammensetzungen und Lagerungsbedingungen sind in den **Abb. 3 bis 6** dargestellt. Aus einer vergleichenden Analyse der Ergebnisse lässt sich folgendes festzustellen:

Bei der meisten NT-Rezepturen sind folgende grundsätzliche Unterschiede gegenüber den entsprechenden HBG-Rezepturen zu beobachten: geringere Rohdichten, höhere Porositäten, höhere Wasseraufnahmen und niedrigeren Festigkeiten (um 20-40%). Dieser Effekt ist mit dem höheren Wasseranspruch des NT-Gipses zu erklären.

Ziegelmehl hat kaum Einfluss auf die Mörtelrohndichten, führt aber zur Erhöhung der offenen Porositäten und der Wasseraufnahmen bei beiden Hochbrandgipsen. Weiterhin reduziert Ziegelmehl die Druckfestigkeiten, wobei jedoch zu erkennen ist, dass die Festigkeit der HBG-Mischung unter Lagerungsbedingung B bis an den Wert der Festigkeit des reinen HBG-Mörtels steigt.

Holzkohle bewirkt eine sehr leichte Verminderung der Rohdichten. In den HBG-Rezepturen erhöht Holzkohle nennenswert die offene Porosität und die Wasseraufnahme, in den NT-Rezepturen deutlich weniger. Die Reduzierung der Festigkeiten ist bei HBG etwas deutlicher als bei NT.

Die Zugabe von Sumpfkalk führt im Hochbrandgips und im Stuckgips zu einer Erhöhung der offenen Porosität und der Wasseraufnahme sowie zu einer Reduzierung der Druckfestigkeit. In die genau gegensätzliche Richtung beeinflusst Sumpfkalk diese Eigenschaften in der Mischung mit NT.

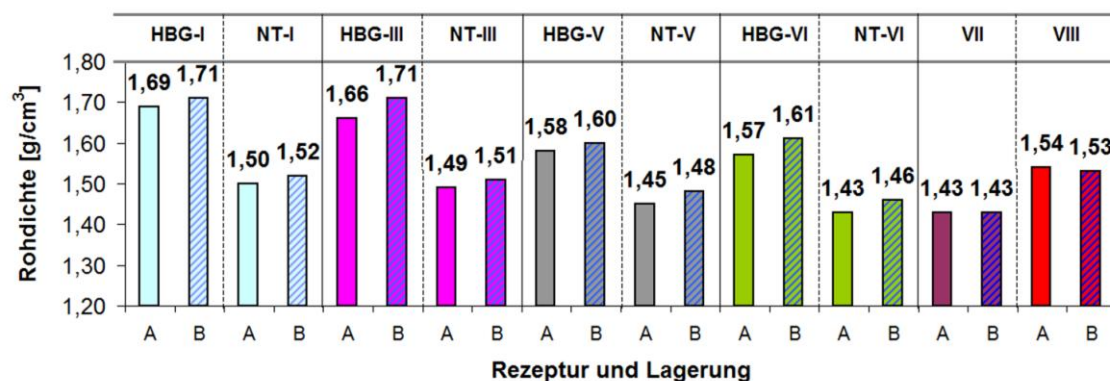


Abb.3: Rohdichten in Abhängigkeit von Art der Bindemittel (Herstellungstemperatur), Zugaben und Lagerungsbedingungen (A und B)

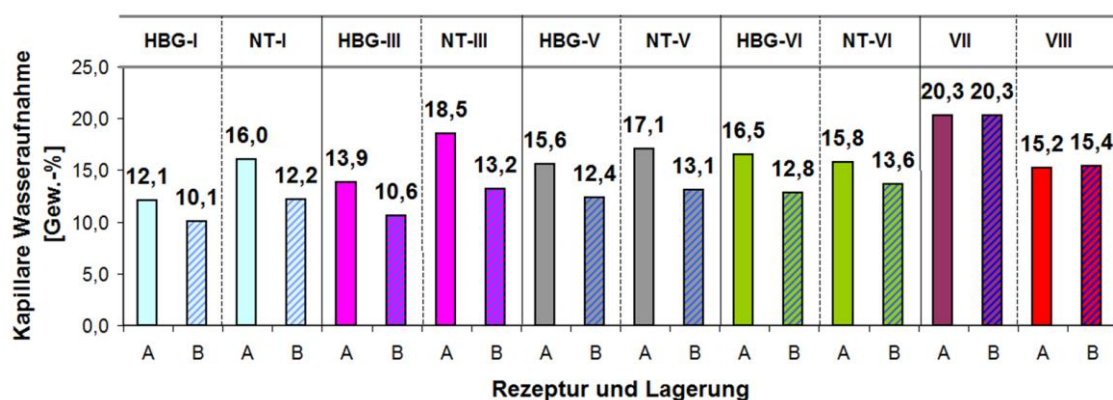


Abb.4: Kapillare Wasseraufnahmen in Abhängigkeit von Art der Bindemittel (Herstellungstemperatur), Zugaben und Lagerungsbedingungen (A und B)

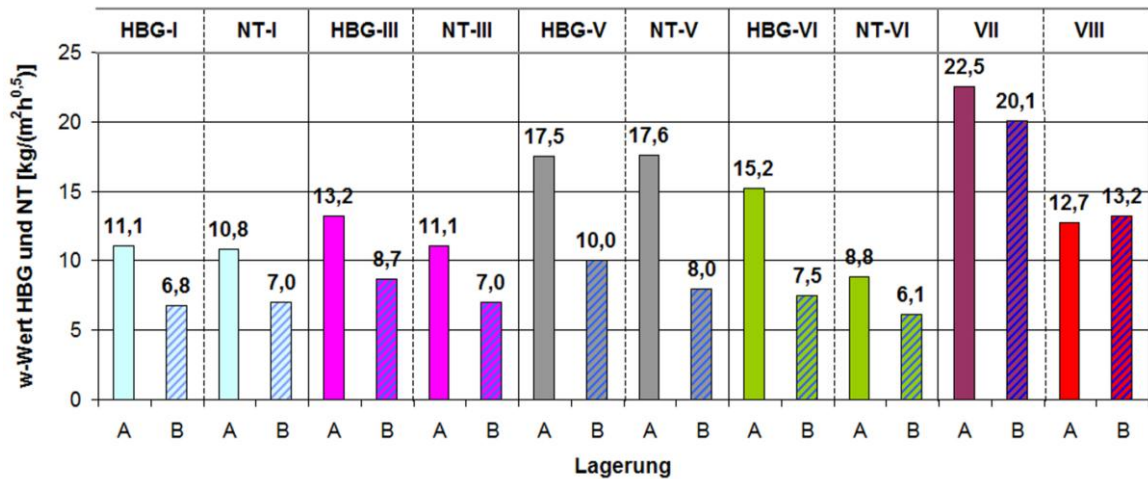


Abb.5: Wasseraufnahmekoeffizienten der ausgewählten HBG-Rezepturen im Vergleich mit NT- und Stuckgipsrezepturen, in Abhängigkeit von Lagerungsbedingungen (A und B)

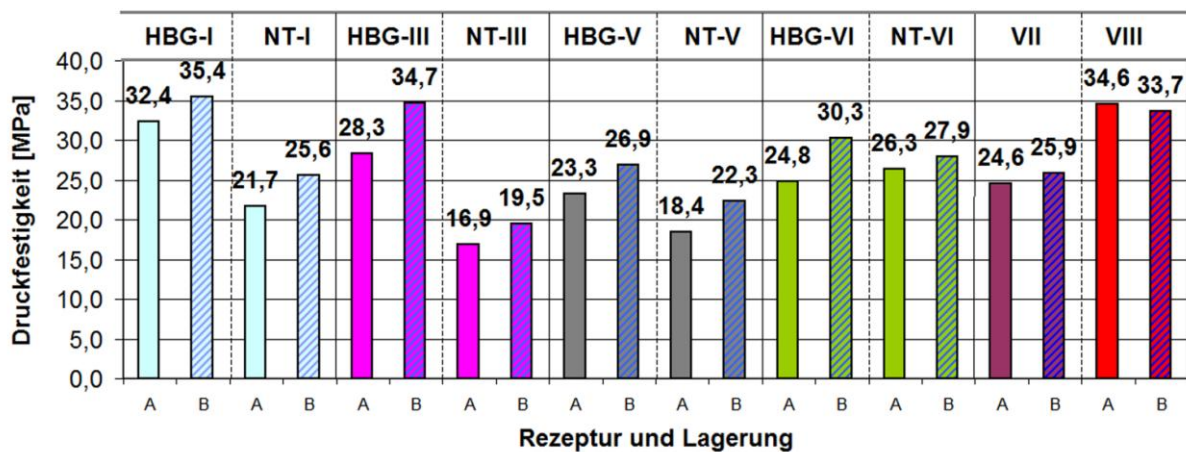


Abb.6: Druckfestigkeiten ausgewählter HBG-Rezepturen im Vergleich mit NT- und Stuckgipsrezepturen, in Abhängigkeit von Lagerungsbedingungen (Messung in trockenem Zustand)

Zum Einfluss der Lagerungsbedingungen: Es konnte nachgewiesen werden, dass die zyklische Befeuchtung bei Lagerung B zur Verdichtung der Gefüge führt, was sich deutlich in der Verringerung der offenen Porosität, einer Reduzierung der Wasseraufnahme und des Wasseraufnahmekoeffizienten sowie der Steigerung der Festigkeiten widerspiegelt. Diese Änderungen sind in den NT-Mörteln stärker ausgeprägt als in den HBG-Mörteln.

Eine regelmäßige Befeuchtung führt also an beiden Hochbrandgips-Bindemitteln zu einer Verbesserung der Wasserresistenz. Die Verdichtung entsteht durch weitere Hydratation des in den abgebundenen Mörteln vorhandenen Restanhydrits. Diese Ergebnisse sind eng mit den Beobachtungen an historischen Gipsmörteln verbunden, deren Dauerhaftigkeit aus jahrhundertelangen Lösungs- und Kristallisationsprozessen resultiert, die zur Verdichtung der Gefüge und letztlich zu einer Steigerung der Beständigkeit führten [7].

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der in diesem Abschnitt aufgezeigten Festmörteleigenschaften mit den „Zielvorgaben“, also den an gotischen Mörteln von der Toruner Ordensburg ermittelten Kennwerten. Das Ziel einer möglichst guten optischen und materialkundlichen Annäherung an die zu ergänzenden Objekte wurde weitgehend erreicht.

Tabelle 1: Exemplarische Kennwerte der gotischen Mörtel von der Toruner Ordensburg im Vergleich mit gleichfarbigen HBG-Rezepturen. Die Pfeile zeigen die Tendenzen bei Lagerung B

Eigenschaften		Rosafarbige Mörtel			Graue Mörtel		
		gotisch	HBG-III	NT-III	gotisch	HBG-V	NT-V
Rohdichte	[g/cm ³]	1,5-1,6	1,7	1,5	1,5 - 1,7	1,6	1,5
Offene Porosität	[Vol-%]	15-23	23→18	28→20	12-16	24→20	25→19
Wasseraufnahme	[Gew.-%]	10-15	14→11	18→13	7-11	15→12	17→13
Druckfestigkeit	[MPa]	8-21*	28→35	17→19	16-28*	23→27	18→22

* die Werte wurden an Kleinproben als Stempeldruckfestigkeit (DIN 18555-9) ermittelt

6. Dynamisches E-Modul

Die Messung des dynamischen E-Moduls wurde nur an den Prüfkörpern aus Lagerung A durchgeführt (Abb. 7).

Für den reinen HBG-Mörtel beträgt der Wert 13.200 MPa. Ziegelmehl-, Holzkohle- und Sumpfkalkzugabe verursachen eine Reduzierung des bis auf etwa 10.000 MPa, wobei Holzkohle und Sumpfkalk einen stärkeren Einfluss als Ziegelmehl zeigen.

Die NT-Mörtel weisen grundsätzlich niedrigere dyn. E-Moduli als der HBG auf. Der Wert für den reinen NT-Mörtel beträgt 8.300 MPa. Ziegelmehl- bzw. Holzkohlezugabe reduzieren den dyn. E-Modul bis auf 6.600 MPa. Sumpfkalk bewirkt beim NT einen Anstieg des E-Moduls auf 9.300 MPa, was aber nicht im Einklang mit der Wirkung des SK am HBG steht.

Die Werte des dyn. E-Moduls für die Stuckgips-Mörtel liegen im Bereich von 12.000 (reiner SG) und 9.800 MPa (SG mit Sumpfkalk).

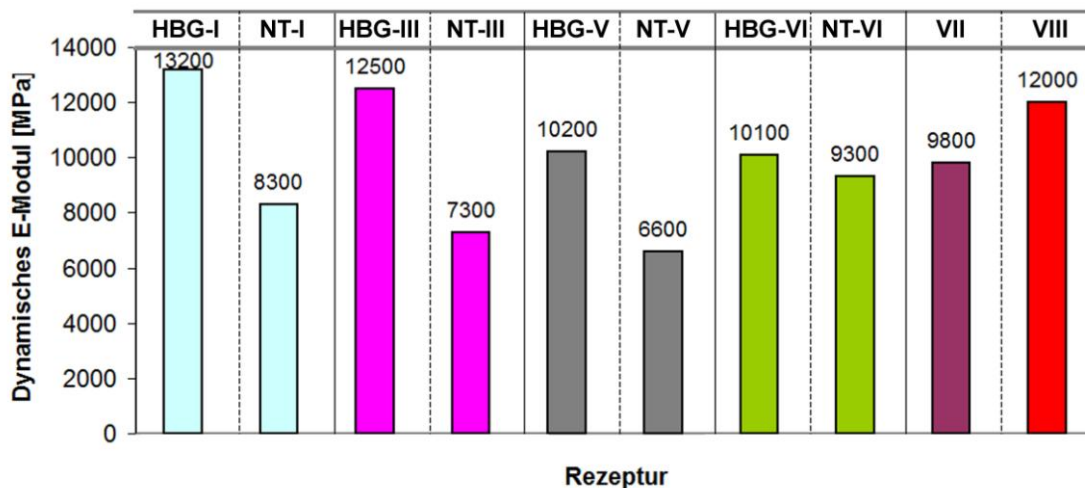


Abb.7: Dynamische E-Moduli ausgewählter Rezepturen (nur Lagerung A)

7. Hygrische Dehnung

Die hygrische Dehnung wurde nur an den reinen Bindemittel-Mischungen des HBG und NT über Längenmessungen mittels Setzdehnungsmesser ermittelt (DIN 52 450, Verfahren A). In einem ersten Versuch wurden hierfür Prismen nach 28 Tagen (Vor-)Lagerung A verwendet (Kurven NT-alt und HBG-alt in Abb. 8). Um das vollständige Längenänderungsverhalten beurteilen zu können, wurden in einem zweiten Versuch, der aber nur am NT durchgeführt werden konnte, NT-Prismen unmittelbar nach dem Ausschalen unter Lagerungsbedingungen A und B gemessen (Kurven NT-A und NT-B in Abb. 8).

Nach fünf Befeuchtungszyklen wies das vorgelagerte HBG-Prisma ein Dehnung von 0,55 mm/m auf, das vorgelagerte NT-Prisma hingegen einen deutlich höheren Wert von 4,0 mm/m.

Durch die zweite Versuchsreihe konnte nachgewiesen werden, dass zumindest beim NT, unmittelbar nach dem Ausschalen ein frühes Dehnen stattfindet. Bei Lagerung A (keine zusätzliche Befeuchtung) erreicht diese Dehnung in den ersten fünf Tagen nach dem Entformen 4,4 mm/m. Bei weiterer normaler Lagerung vermindert sich dieser Wert leicht und tendiert zur Konstanz. Demgegenüber verursacht Lagerung B mit jeder Befeuchtung der Probe eine Fortsetzung des Quellens. Nach 24 Tagen mit insgesamt sechs Wasserbehandlungen beträgt die Dehnung am NT 11,5 mm/m. Die kontinuierliche Steigung der Kurve bis zu diesem Zeitpunkt lässt eine Fortsetzung der Dehnung bei weiterer Wasserzufuhr erwarten.

Als Ursache der Dehnungen kann die Hydratation von Anhydrit in den Prüfkörpern angenommen werden. Aufgrund des höheren Gehaltes an reaktivem Anhydrit ist die hygrische Dehnung am NT deutlich größer als am HBG. Die Dehnungen sind irreversibel.

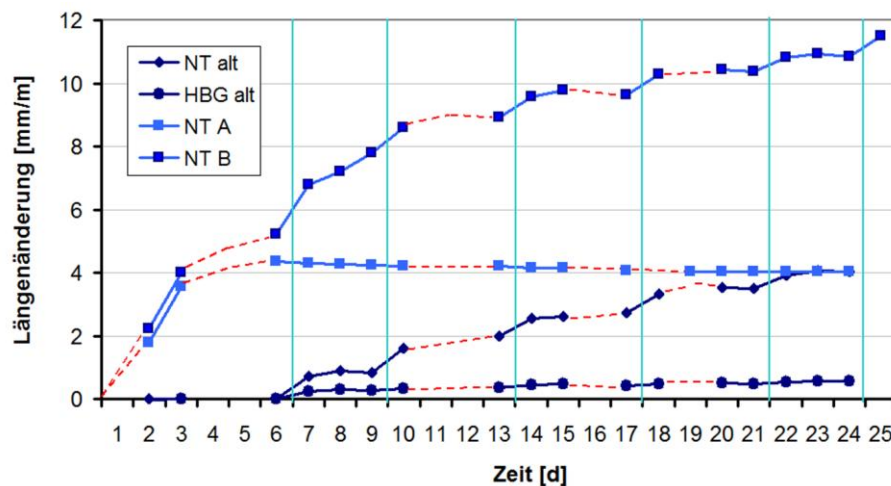


Abb.8: Hygrische Dehnung in Abhängigkeit von Zeit und Wasserbehandlung. Die vertikalen blauen Linien markieren die Zeitpunkte der Wasserlagerungen (Proben NT alt, HBG alt, NT B).

Die roten Kurvenabschnitte ergänzen den vermutlichen Verlauf der Kurve in den Messpausen.

8. Frostbeständigkeit

Es existieren keine normativen Regelungen zur Durchführung und Interpretation von Frostwiderstandsprüfungen an Gipsmörteln. Daher erfolgte die Prüfung der Frostbeständigkeit in Anlehnung an ein älteres, für Vormauerziegel entwickeltes Verfahren (DIN 52252-1:1982). Etwa 4,5x4x4 cm große Gipsmörtel-Würfel der verschiedenen Rezepturen wurden bis -20°C befroren und anschließend in Wasser bei +20°C aufgetaut. Die Prüfung umfasste 25 Zyklen.

Es wurden keine Risse an den Proben festgestellt. Allerdings zeigen sich an allen sumpfkalkfreien Hochbrandgipsrezepturen (HBG und NT) Aufrauung der Oberflächen durch kleine Absplitterungen. Die damit verbundenen Materialverluste betragen bei den HBG-Mörteln um 4%, beim NT sind sie mit 2-3% etwas geringer. Die Materialverluste beim Stuckgips liegen bei 4%. Eine Kalkzugabe vermindert die frostbedingten Materialverluste aller Gipsbindemittel.

Die Festigkeitsverluste der Hochbrandgipsmörtel durch den Frost sind sehr unterschiedlich und werden von der Lagerung stärker beeinflusst als von der Brenntemperatur der Bindemittel. An den Proben aus Lagerung B wird die Festigkeit stärker reduziert als an denen aus Lagerung A. Beispielsweise zeigt die Rezeptur NT-V bei Lagerung A einen Festigkeitsverlust von 4% gegenüber 21% bei Lagerung B. Die Festigkeitsverluste sind bei den NT-Mörteln geringer als bei den HBG-Mörteln. Für die stuckgipsbasierten Mischungen sind hohe Festigkeitsverluste zwischen 30-40% typisch.

Die besten Ergebnisse im Frostversuch – also die höchste Beständigkeit - erbrachte die Mischung NT mit Sumpfkalk (NT-VI). Der Materialverlust lag bei 1%, der Festigkeitsverlust betrug 0,8% bei Lagerung A und 2% bei Lagerung B.

Eine allgemeine Korrelation zwischen Materialverlusten und Druckfestigkeitsverlusten konnte nicht festgestellt werden.

Angesichts der scharfen Prüfbedingungen ist für den realen Anwendungsfall eine zufriedenstellende Frostbeständigkeit der Hochbrandgipsmörtel zu erwarten.

9. Salzbeständigkeit

Der Salzsprengtest erfolgte in Anlehnung an DIN 52111:1990, Verfahren B. Die Proben (Würfel 4x4x4cm) wurden vier Stunden mit 10%-iger Natriumsulfatlösung getränkt und danach bei 40°C getrocknet und gewogen. Insgesamt wurden 10 Zyklen durchgeführt. Zur Auswertung wurden Masseänderungen und Materialverluste sowie die Beobachtungen während der Prüfung herangezogen.

Es hat sich gezeigt, dass die HBG-Rezepturen im Allgemeinen beständiger als die NT-Rezepturen sind (außer NT-VI). Außerdem treten die Schäden an den HBG-Mörteln langsamer ein und die Massenverluste sind deutlich geringer.

Ziegelmehl und Holzkohle verschlechtern die Salzbeständigkeit gegenüber den reinen Bindemitteln, Ziegelmehl führt zu charakteristischen, tiefen Rissen.

Am besten haben im Salzsprengtest die beide Hochbrandgipsmischungen mit Sumpfkalk abgeschnitten (HBG-VI und NT-VI), gefolgt von reiem HBG und reinem Stuckgips.

Es wurde keine positive oder negative Beeinflussung der Salzbeständigkeit durch Lagerung B festgestellt, die Details und Ursachen hierzu müssen noch analysiert werden.

10. Ausblühungen

Die HBG-Mörtel weisen bei Lagerung B Ausblühungen auf. Die Salze sind besonders stark an den Rezepturen mit Holzkohle erkennbar und führen zu optischen Beeinträchtigungen, die aus restauratorischer Sicht unerwünscht sind. Die Analyse mittels REM/EDX zeigte, dass die Ausblühungen aus Magnesiumsulfat bestehen, dessen Entstehung über die Zusammensetzung des Rohstoffes und die Brenntemperatur zu erklären ist. Bei hoher Brenntemperatur (um 900°C) wurden die natürlichen Dolomitverunreinigungen des Gipsgesteins (dolomitische Mergel) thermisch zersetzt und aktiviert (ab 700°C). Die Verwendung des bei etwa 600°C hergestellten NT-Hochbrandgipses hat die Ausblühneigung stark reduziert, aber nicht ganz verhindert.

Das Reservoir an ausblühfähigen Salzen ist begrenzt, so dass nach Entfernung evtl. aufgetretener Salze von der Oberfläche nur eine begrenzte Neubildung zu erwarten ist.

11. Freibewitterung

Die Frage der tatsächlichen Wetterbeständigkeit der untersuchten Mörtelmischungen bleibt noch offen. Die Labortests zeigen die allgemeinen Reaktionen der Hochbrandgipse auf Zusätze und bestimmte Faktoren. Sie liefern damit eine sehr gute Vergleichsbasis zwischen den untersuchten Rezepturen unter Laborbedingungen.

Das Beispiel des Einflusses der Lagerungsbedingungen zeigt, dass Lagerung B zwar eine Erhöhung der Wasserbeständigkeit bewirkt, bei der Frostbeanspruchung erwies sich das aber als ungünstig. Zur Erklärung, ob es möglicherweise zu ungünstigen Veränderungen im Porenraum kommt, sind weitere Analysen nötig (Porenradienverteilung, Mikroskopie). Die Lagerung B soll die natürliche regelmäßige Befeuchtung und langsame Trocknung simulieren, die ja als grundsätzlich positiv eingeschätzt wird. Gegenüber den gleichmäßigen Laborbedingungen haben am Bauwerk aber auch die Intensität und Häufigkeit des Niederschlags sowie durch Wind und andere Faktoren verursachte unterschiedliche

Geschwindigkeiten der Trocknungsprozesse Einfluss auf die Auflösungs-, Hydratations- und Rekristallisationsprozesse.

Aus den festgestellten Schadensbildungen an den Proben sollte also nur bedingt auf ihre reale Beständigkeit geschlossen werden, weil die Salz- und Frostversuche unter verschärften Bedingungen durchgeführt wurden, in der Natur treten solche extremen Belastungen sehr selten auf.

In der realen Bauwerkssituation wirken mehrere Umwelteinflüsse auf die Mörtel ein, deren Wirkung zwar milder als in Laborversuch aber auch komplexer ist. Um den realen Einfluss dieser Effekte beurteilen zu können, wurde im November 2011 ein Dauertest im Außenbereich begonnen. Hierzu wurden mehrere Prismen verschiedener Rezepturen ausgelagert, so dass mehrjährige Beobachtungen und entsprechende Untersuchungen möglich sind.

Fazit

Die untersuchten Hochbrandgipse HBG und NT bieten durch Modifikation der Anteile der einzelnen Fraktionen des Bindemittels sowie durch Zugabe von Ziegelmehl und Holzkohle die Möglichkeit zur individuellen, imitierenden Anpassung an die verschiedenen historischen Mörtel.

Die gestalterischen Zusätze beeinflussen die Eigenschaften der Hochbrandgipsmörtel zwar grundsätzlich negativ aber in akzeptablen Grenzen. Damit konnte das Ziel einer möglichst guten optischen und materialkundlichen Annäherung der Reparaturmörtel an die zu ergänzenden Objekte erreicht werden (**Abb. 9**).

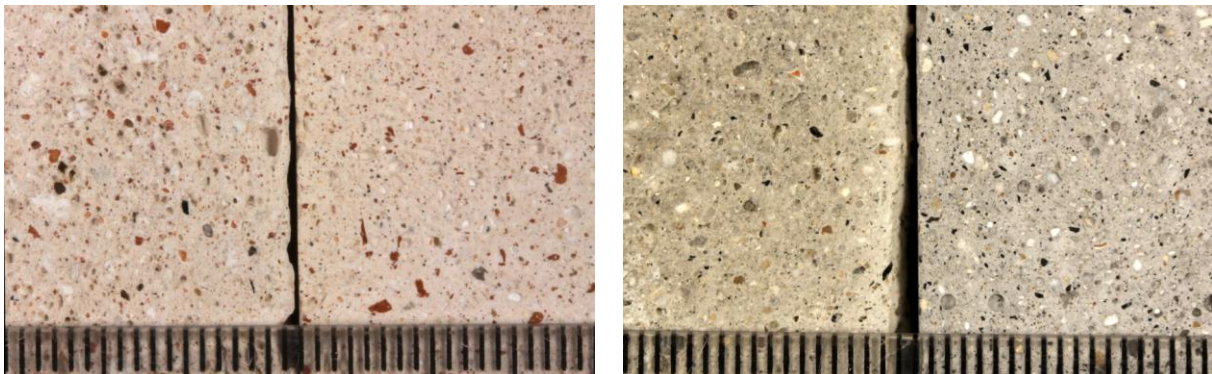


Abb.9: Rosafarbene und graue Gipsmörtel. Gegenüberstellung der gotischen „Zielvorgaben“ aus der Toruner Ordensburg (jeweils linke Bildhälfte) mit den aus Hundisburger Hochbrandgips hergestellten Ergänzungsmörteln (jeweils rechte Bildhälfte)

Für den Einsatz der untersuchten Mischungen im Bereich Bauwerkserhaltung / Restaurierung lassen sich folgende Anwendungsmöglichkeiten und Verarbeitungshinweise ableiten:

1. Hochbrandgips HBG mit Ziegelmehl- und Holzkohleanteilen kann für Ergänzungen an mittelalterlichen, architektonischen Details im Innenbereich empfohlen werden.
2. Die Eignung des o.g. HBG für Ergänzungen im Außenbereich kann noch nicht abschließend bewertet werden. Für eine experimentelle Bestätigung der guten Tendenzen in den Laborversuchen sind noch ergänzende Untersuchungen nach ausreichend langer Freibewitterung an Testflächen nötig.
3. Hochbrandgips NT scheint aufgrund der starken Quellneigung durch hygrische Dehnung nur eingeschränkt verwendbar und ist für eine Anwendung im Außenbereich nicht geeignet. Bei wiederholtem Kontakt mit Wasser kann es zu Verformungen und schädigenden Spannungen kommen.

4. Hinweise für die Nachbehandlung am Objekt: Um den im Labor erreichten Kennwerten unter Bauwerksbedingungen möglichst nahe zu kommen, sollten die applizierten Mörtel besonders innerhalb der ersten 48 Stunden durch Abdecken feucht gehalten werden. Es ist empfehlenswert, den Mörtel bis zur einer Woche vor schneller Austrocknung zu schützen und leicht zu befeuchten. Eine Nachbehandlung über 28 Tage im Sinne der Lagerung B ist nicht nötig.

Danksagung

Die Realisierung des Forschungsprojektes war dank der Förderung durch das Stipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt möglich. Vielen Dank an das Technische Denkmal Ziegelei Hundisburg e.V. für alle zur Verfügung gestellte Materialien und insbesondere für die Durchführung eines Sonderbrandes bei 600°C.

Außerdem danken die Autoren Jewgenij Derr vom Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen für die STA (TG-DSC) – Analysen und die XRD-Untersuchungen.

Literatur

- [1] BROCHWICZ Z. (1984) Badania składu mineralnego sztucznego kamienia w XIV-wiecznych rzeźbach i elementach architektonicznych na zamku w Malborku, PP PKZ, Warszawa
- [2] JURKOWLANIEC T. (1989) Gotycka rzeźba architektoniczna w Prusach, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław-Warszawa-Gdańsk-Łódź, ISBN 83-04-02935-9
- [3] JAKUBEK M., SCHLÜTTER F., OBERTA W., ŁUKASZEWICZ J. W. (2010): Medieval Gypsum Mortars Used for Architectural Details in the Castle of the Teutonic Order in Toruń, Poland. In: *Historic Mortars and RILEM TC 203-RHM Final Workshop HMC 2010. Proceedings of the 2nd Historic Mortars Conference and of the Final Workshop of RILEM TC 203-RHM*, hrsg. von J. Válek, C. Groot, J.J. Hughes, e-ISBN 978-2-35158-112-4, 2010 Edition, S.227-237
- [4] SCHLÜTTER F., KAISER W., JULING H. (2010) High Fired Gypsum Mortar for Screeds, Terrazzo and Masonry Repair on Historic Monuments. Production, Properties and Sample Applications. In: *Historic Mortars and RILEM TC 203-RHM Final Workshop HMC 2010. Proceedings of the 2nd Historic Mortars Conference and of the Final Workshop of RILEM TC 203-RHM*, hrsg. von J. Válek, C. Groot, J.J. Hughes, e-ISBN 978-2-35158-112-4, 2010 Edition, S. 1169-1180
- [5] SCHLÜTTER F. (2010) Materialkundliche Untersuchungen zur Instandsetzung des gipshaltigen Mauerwerks am Kämmereigebäude des Rathauses in Lüneburg. In: *Instandsetzung gipshaltigen Mauerwerks. Neues aus Forschung und Praxis. IfS-Bericht 35-2010, ISSN 0945-4748*, S. 129-141
- [6] GIPS DATENBUCH (2006) Bundesverband der Deutschen Gipsindustrie (Hrsg.)
- [7] MIDDENDORF B. (2003): Physico-mechanical and microstructural characteristics of historic and restoration mortars based on gypsum. Current Knowledge and perspective. In: *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*. Geological Society, London, Special Publication No.205, ISBN 1-86239-123-8, S.165-176